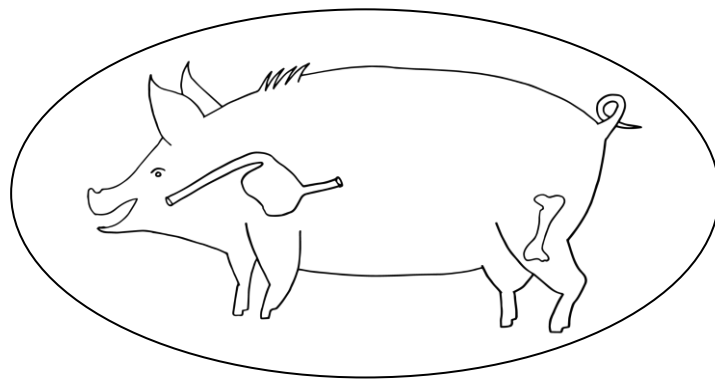


**Die Verteilung der stabilen Isotope von
Strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) und Sauerstoff ($\delta^{18}\text{O}$)
in den Körpergeweben von
Hausschweinen (*Sus scrofa*)**

Dissertation der Fakultät für Biologie
der Ludwig-Maximilians-Universität München



Dominic Florian Anders
München, 19.02.2020

Diese Dissertation wurde angefertigt
unter der Leitung von Prof. Dr. Gisela Grupe
in der Arbeitsgruppe Anthropologie und Umweltgeschichte, Department II Biologie
an der Ludwig-Maximilians-Universität München

Erstgutachter/in: Prof. Dr. Gisela Grupe
Zweitgutachter/in: Prof. Dr. Roland Melzer

Tag der Abgabe: 19.02.2020

Tag der mündlichen Prüfung: 21.07.2020

ERKLÄRUNG

Ich versichere hiermit an Eides statt, dass meine Dissertation selbständig und ohne unerlaubte Hilfsmittel angefertigt worden ist.

Die vorliegende Dissertation wurde weder ganz noch teilweise bei einer anderen Prüfungskommission vorgelegt.

Ich habe noch zu keinem früheren Zeitpunkt versucht, eine Dissertation einzureichen oder an einer Doktorprüfung teilzunehmen.

München, den 19.02.2020

Dominic Anders

Inhaltsverzeichnis

I.	Einleitung.....	7
A.	Herkunftsanalyse – ein gefragtes Instrument in verschiedenen Fachbereichen.....	7
B.	Fragestellung und Beschreibung der Fütterungsstudie	8
C.	Beschreibung des Versuchshofes	10
D.	Strontium und seine stabilen Isotope in Geosphäre, Hydrosphäre und Biosphäre.....	11
1.	Strontium in Gesteinen und Böden.....	13
2.	Strontium in Gewässern und Niederschlag.....	15
3.	Anthropogene Strontiumquellen	16
4.	Strontium in Ökosystemen und Lebewesen	16
5.	Anwendung und Erforschung von stabilen Strontiumisotopen in verschiedenen Fachbereichen	26
E.	Sauerstoff und seine stabilen Isotope.....	29
1.	Anwendung und Erforschung von stabilen Sauerstoffisotopen in verschiedenen Fachbereichen	29
2.	Sauerstoff und seine stabilen Isotope ($\delta^{18}\text{O}$) im tierischen Organismus	31
II.	Fütterungsstudie, Material und Methoden.....	55
A.	Ablauf des Fütterungsexperimentes, Beprobung und Lagerung der Proben	55
1.	Futter, Trinkwasser und Boden	57
2.	Proben von den Schweinen.....	61
B.	Bearbeitung der einzelnen Probentypen	64
1.	Bearbeitung von Knochen und Zähnen für weitere Analysen.....	64
2.	Extraktion des Strontiums aus tierischen mineralisierten Hartgeweben (Knochen, Zahnschmelz).....	66
3.	Extraktion des Strontiums aus tierischen Weichgeweben (Fleisch, Organe, Blut)	70
4.	Extraktion des Strontiums aus Schweineborsten.....	73
5.	Extraktion des Strontiums aus anorganischen Umweltproben (Boden, Wasser)	76
6.	Extraktion des Strontiums aus den Futterproben.....	78
7.	Konzentrationsbestimmung von Strontium	80
8.	Extraktion des Phosphates aus tierischen mineralisierten Hartgeweben (Knochen, Zahnschmelz).....	81
9.	Sauerstoffisotopenverhältnisse von organischen Proben (Fleisch, Organe, Blut, Futter, Borsten)	84
10.	Sauerstoffisotopenverhältnisse von Wasser.....	87
11.	Massenspektrometrie	87
III.	Ergebnisse (Strontium).....	89
A.	Ergebnisse der Konzentrationsbestimmungen	89

B.	Ergebnisse der Isotopenmessung.....	92
IV.	Diskussion (Strontium)	102
A.	Bodenproben.....	103
B.	Wasser	105
C.	Futter	105
D.	Schweine	107
1.	Begründung für den Ausschluss der Borstenproben.....	107
2.	Konzentrationen	108
3.	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	109
4.	Fazit und Implikationen	114
V.	Geprüfte publizierte Methoden zur Schätzung der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte.....	115
A.	Modellierung von $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$	116
1.	Lineare Modellierung:	116
2.	Massebilanz-Modellierung:	117
B.	Modellierung von $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$	123
1.	Lineare Modellierung:	123
2.	Massebilanz-Modellierung:	123
C.	Modellierung von $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$	125
1.	Lineare Modellierung:	125
VI.	Ergebnisse (Sauerstoff).....	126
A.	Umweltproben	128
1.	Trinkwasser.....	128
2.	Futter	131
B.	Schweine	134
1.	Weichgewebe	136
2.	Borsten	146
3.	Phosphat.....	147
4.	Standards.....	153
C.	Modelle.....	154
1.	Körperwasser.....	154
2.	Borsten	159
3.	Phosphat.....	162
VII.	Diskussion (Sauerstoff).....	165
A.	Trinkwasser.....	165
B.	Futter	167
C.	Schweineproben.....	171

1.	Weichgewebe	174
2.	Borsten	186
3.	Phosphat.....	191
D.	Fazit und Implikationen	202
VIII.	Zusammenfassung und Ausblick	204
IX.	Literaturverzeichnis.....	205
X.	Abbildungsverzeichnis.....	251
XI.	Tabellenverzeichnis	256
XII.	Anhang.....	262
A.	Einleitung.....	262
B.	Methoden.....	263
C.	Ergebnisse.....	268
1.	Strontium.....	268
2.	Sauerstoff	273
XIII.	Danksagung	279
XIV.	Lebenslauf: Dominic Anders	282

„Von außen – und erst recht von innen – sieht der Prozess wissenschaftlicher Forschung ungeordnet und verwirrend aus. Man ist versucht zu glauben, Wissenschaftler seien selber unordentlich und verwirrt. In gewisser Hinsicht sind sie es – das gehört zur Forschung. Wenn man wüsste, was man tut, wäre es keine Forschung.“

— Terry Pratchett

I. Einleitung

A. Herkunftsanalyse – ein gefragtes Instrument in verschiedenen Fachbereichen

Nicht erst seit den jüngsten Lebensmittelskandalen, wie beispielsweise dem weitreichenden Listerienbefall in Wurstwaren einer großen Fleischverarbeitungskette (Welt 17.10.2019), besteht bei Verbrauchern und Verbraucherschutzorganisationen ein vermehrtes Interesse an der gesicherten Herkunft von Lebensmitteln. Auch ein gesteigertes Nachhaltigkeitsbewusstsein in der Öffentlichkeit führt dazu, dass der Authentizitätsprüfung von landwirtschaftlichen Produkten ein immer höher werdender Stellenwert beigemessen wird. Gerade in einer globalisierten Welt wird es zunehmend schwieriger, dieser Aufgabe gerecht zu werden und einen Überblick über Transportwege und Ursprünge von Waren zu behalten. Deswegen werden immer neue wissenschaftliche Methoden erprobt und bestehende Ansätze weiterentwickelt, um fragliche Produkte einer Qualitätsprüfung zu unterziehen.

Hierzu gehört, neben Multielementprofilen, DNA-Analysen und mikrobiologischen Tests auch die Untersuchung stabiler Isotopenverhältnisse verschiedener Elemente (Sieper et al. 2006, Camin et al. 2007, Crittenden et al. 2007, Heaton et al. 2008, Baroni et al. 2011). Je nachdem, welche Isotopensysteme man dabei heranzieht, lassen sich so beispielsweise Rückschlüsse auf die Fütterungsweise ziehen (Kohlenstoff: $\delta^{13}\text{C}$ und Stickstoff: $\delta^{15}\text{N}$) oder die geografische Herkunft basierend auf den geologischen (Strontium: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) und hydrologisch-klimatischen (Wasserstoff: δD und Sauerstoff: $\delta^{18}\text{O}$) Hintergründen untersuchen (Boner & Förstel 2004, Franke et al. 2007, Zhao et al. 2016, Webb et al. 2017). Viele dieser Methoden können bisher aber nur sehr grobe Unterscheidungen treffen oder befinden sich noch in der Grundlagenforschung, sodass ihre praktische Anwendbarkeit in der Lebensmittelkontrolle nur eingeschränkt möglich ist (Franke et al. 2007, Franke et al. 2008, Coelho et al. 2017).

Auch in anderen Fachbereichen kommen dieselben Methoden zum Einsatz und helfen dabei, Aussagen über die potentielle Herkunft, Migration oder Mobilität von archäologischen Populationen, unbekannten Toten in der Rechtsmedizin oder wilden Tieren bei ökologischen Fragestellungen treffen zu können (Hölzl et al. 2004, Fry 2007, Lehn & Graw 2014, Grupe et al. 2015). Für alle diese Anwendungsgebiete ist ausschlaggebend, dass die Mechanismen, welche zu spezifischen Isotopenverhältnissen in bestimmten Probentypen führen, so gut wie möglich bekannt und erforscht sind. Nur so können die Verteilungsmuster und isotopischen Bandbreiten in entsprechenden Gebieten verstanden und bei der Unterscheidung von verschiedenen Standorten sinnvoll interpretiert werden.

Obwohl bereits viele Studien zu den lokalen Verteilungsmustern diverser isotopischer Systeme existieren, ist über viele Zusammenhänge, besonders in Bezug auf die Verbindung zwischen organismischen Proben und deren Umwelt, erstaunlich wenig bekannt. In herkömmlichen Studien werden häufig die Proben eines Typs über geografische Gebiete hinweg miteinander verglichen und so voneinander abgegrenzt (Boner & Förstel 2004, Camin et al. 2007, Crittenden et al. 2007, Franke et al. 2008). Einige Studien setzen die Isotopenverhältnisse von bestimmten organischen Proben auch in Zusammenhang mit lokalen anorganischen Vergleichsproben und kommen so zur Etablierung von geografischen Vorhersagemodellen, welche aber in der Regel nur für den Zusammenhang der in Relation gesetzten Parameter gelten (Bowen & Revenaugh 2003, Kelly et al. 2005, Di Paola-Naranjo et al. 2011, Frei & Frei 2011, Ryan et al. 2018). Um die Stoffkreisläufe und Mechanismen eines Systems besser einschätzen zu können, sind Fütterungsstudien an einem bestimmten Standort eine

Möglichkeit, zahlreiche Parameter, Trophieebenen und Probenotypen miteinander in Relation zu setzen. Solche wurden im Bereich der Stabilisotopenforschung jedoch noch nicht oft durchgeführt (Sponheimer & Lee-Thorp 1999, Tuross et al. 2008, Biondi et al. 2013, Webb et al. 2017, Chen & Auerswald 2018, Green et al. 2018). Das liegt unter anderem daran, dass solche Experimente oft kostenintensiv und arbeitsaufwändig sind. Außerdem kann es sein, dass die Kontrolle der Parameter so intensiv ist, dass es zu Bedingungen kommt, die nur im Labor, nicht aber in der Realität vorkommen, was die allgemeine Aussagefähigkeit der so generierten Ergebnisse schmälert. Dennoch sind Fütterungsstudien ein wichtiger Baustein für das Verständnis derjenigen Mechanismen, die zur lokalen Variabilität der entsprechenden Isotopenverhältnisse in den verschiedenen Proben- und Gewebetypen führen.

B. Fragestellung und Beschreibung der Fütterungsstudie

Im Zuge dieser Arbeit wurde eine Fütterungsstudie an Hausschweinen (*Sus scrofa*) durchgeführt, die das Ziel hatte, die Verhältnisse stabiler Isotope von Strontium und Sauerstoff auf ihrem Weg von der Umwelt der Tiere in den Organismus zu erfassen und dadurch besser verstehen zu können. Hierfür wurden das Futter und Trinkwasser der Versuchstiere erfasst, sowie auch die Umgebungsbedingungen. Auf diese Weise konnte überprüft werden, welche Isotopenverhältnisse in den Körper gelangen, wie sie sich innerhalb des Organismus verhalten und in welcher Art und Weise sie die Zusammensetzung bestimmter Körpergewebe beeinflussen.

Die Verhältnisse der stabilen Isotope von Strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) und Sauerstoff ($\delta^{18}\text{O}$) werden in der physischen Anthropologie seit mehreren Jahrzehnten vor allem zur Rekonstruktion von Migrationsereignissen und Mobilität verwendet (Evans et al. 2006, Tütken 2010, Grupe et al. 2015). Bekannt ist die Abhängigkeit der Isotopenverhältnisse von bestimmten abiotischen Umweltfaktoren, wie der zugrunde liegenden Geologie (im Falle des Strontiums) und den klimatischen bzw. topografischen Gegebenheiten (im Falle des Sauerstoffs) (Fry 2007, Michener & Lajtha 2008, Grupe et al. 2015, Pederzani & Britton 2018). In beiden Fällen ist man bei archäologischen Fragestellungen meist auf Referenzwerte aus der lokalen Flora und vor allem Fauna angewiesen, die dann in der Regel direkt mit den an menschlichem Material gemessenen Werten verglichen werden (Price et al. 2002, Bentley 2006, Grupe et al. 2015).

Der direkte Vergleich ist aber nur dann sinnvoll möglich, wenn es zu keiner Fraktionierung oder sonstigen Veränderung der Isotopenverhältnisse von den abiotischen Quellen in die Nahrung und von der Nahrung in den Menschen kommt. Im archäologischen Kontext sind von Mensch und Tier meist nur skelettierte Überreste vorhanden. Da der Mensch normalerweise aber das Fleisch, oder Nebenprodukte wie Milch und Eier der Tiere, sowie deren innere Organe konsumiert, stellt sich die berechnete Frage, ob die Übertragung der Werte von diesen Geweben auf die mineralisierten Hartgewebe so einfach möglich ist. So spielt beispielsweise die Sr-Konzentration in den entsprechenden Nahrungsmitteln wohl eine große Rolle bei der Frage, wie ein globales Isotopenverhältnis im Gewebe zustande kommt (Burton & Wright 1995, Burton & Price 2013, Lewis et al. 2017).

Ein Nahrungswechsel, beispielsweise aufgrund saisonaler Bedingungen oder altersabhängiger Fütterung kann möglicherweise ebenfalls zu stark unterschiedlichen Isotopen in verschiedenen Körperbestandteilen führen, wenn diese zu unterschiedlichen Zeitpunkten und auf verschiedene Weise gebildet werden (Hölzl et al. 2004, Lehn & Graw 2012). Außerdem besteht eine Abhängigkeit von der Umbaurate der jeweiligen Gewebe („Reservoirereffekt“) (Phillips & Eldridge 2006, Tütken 2010).

Viele Aspekte der Stabilisotopenanalyse sind noch nicht, oder nicht ausreichend erforscht, insbesondere Vorgänge, die verschiedene organische Gewebe und Körperbestandteile von Tieren betreffen (Tuross et al. 2008, Burton & Price 2013, Pederzani & Britton 2018).

Bezüglich des Sauerstoffes ist bereits bekannt, dass es zu relevanten abiotischen und biotischen Fraktionierungsprozessen im Körper kommt (Dansgaard 1964, Pederzani & Britton 2018). Diese sind jedoch noch längst nicht hinreichend erforscht und bekannt. Ziel dieser Studie war es, über die Analyse von Proben einer kontrolliert gehaltenen Population von Versuchstieren und deren Umgebung das Wissen über die Verteilung von $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ und $\delta^{18}\text{O}$ zu verfeinern und gängige Richtwerte, Modelle und Schätzmethode anhand dieser Datengrundlage zu überprüfen. Dafür wurde eine kleine Anzahl von nah verwandten, gleichaltrigen Schweinen von ihrer Geburt bis zum Tod begleitet und für die Isotopenzusammensetzung relevante Einflussgrößen erfasst. Die so generierten Daten stellen ein exemplarisches Abbild der Verhältnisse auf einem traditionell geführten, lokal geprägten Schweinemastbetrieb dar und können somit als Grundlage für folgende Vergleiche betrachtet werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind nicht nur für die physische Anthropologie, sondern auch für andere Disziplinen, wie die Ökologie, die Forensik und sogar die Ernährungswissenschaften und die Tierfütterung von Nutzen. Nutztiere und insbesondere Schweine stellen sowohl im Hinblick auf die landwirtschaftsbezogene Forschung als auch auf das Verständnis ihrer grundlegenden Physiologie einen wichtigen Aspekt dar, der für den Menschen von besonderer Bedeutung ist. Außerdem gelten Schweine in der Archäometrie als potentielle Referenzstichproben für isotopenbasierte Herkunftsanalysen an menschlichen Proben, weil sie sich ähnlich ernähren und (in historischen und prähistorischen Zeiten) in der Nähe menschlicher Siedlungen gehalten wurden (Greenfield 1988, Gregg 1988, Bentley 2004, Bentley & Knipper 2005, Bentley 2006). Schweine ähneln dem Menschen in Größe, Ernährung und Physiologie so stark, dass sie selbst in der medizinischen Forschung als Modellorganismen für den Menschen gelten (Watremez et al. 2003, Turk & Laughlin 2004, Kuzmuk & Schook 2011).

Erkenntnisse über ihren Stoffwechsel und ihren Isotopenhaushalt lassen also möglicherweise auch Rückschlüsse auf den Menschen zu. Aber auch abgesehen davon ist über die Physiologie der meisten Nutztiere noch sehr wenig bekannt ist und es besteht hier ebenfalls noch großer Forschungsbedarf (Whittemore 1986, Mroz et al. 1995, Mainzer 2010).

C. Beschreibung des Versuchshofes

Die Versuchstiere stammten vom Biohof Scherm, einem extensiv geführten Schweinemastbetrieb in Höllmannsried bei Kirchberg im Wald in Niederbayern (<https://landschweine.de/>).



Abbildung 1 Lage und Umgebung des Versuchshofes Scherm im Bayerischen Wald. Wie zu erkennen ist, liegt der Betrieb relativ abgelegen und ist weitgehend von Wald umgeben. Die zu erkennenden Felder und Wiesen um den Hof herum gehören teilweise zum Versuchshof und werden zum Anbau von Futtermitteln (Gras, Getreide etc.) genutzt (Satellitenbilder: © Google Maps 2019, Kartendaten © 2019 GeoBasis-DE/BKG (©2009)).

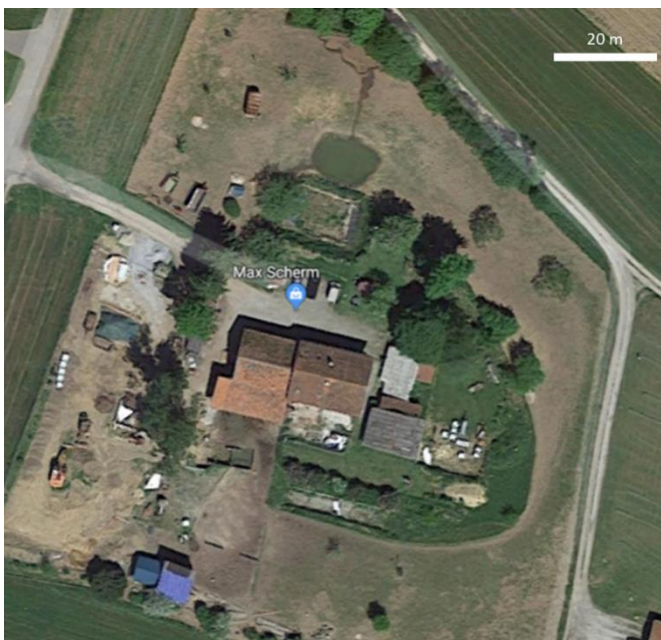


Abbildung 2 Unmittelbare Nutzflächen des Schweinehofes. Im Zentrum sind das Haupthaus und die Schweineställe zu sehen (Satellitenbilder: © Google Maps 2019, Kartendaten © 2019 GeoBasis-DE/BKG (©2009)).

Die Schweinemast des Nebenerwerbshofes umfasst insgesamt zwischen 50 und 120 Schweine, die in einem Außenklimastall gehalten werden, was bedeutet, dass sie über das Jahr hinweg den natürlichen Temperaturschwankungen weitestgehend ausgesetzt sind. Bei den untersuchten Schweinen handelt es sich um die Rasse Schwäbisch Hällisches Landschwein, welcher gute Eigenschaften für die ökologische Landwirtschaft zugeschrieben werden, wie zum Beispiel eine ähnliche Futterverwertung bei ökologischer und konventioneller Haltung (Brandt et al. 2010), hohe Fruchtbarkeit und Milchleistung, sowie gute Muttereigenschaften (Bühler & Postler 2004) und eine große Widerstandsfähigkeit und Langlebigkeit (Pappenberger 2014). Der Hof und die dazugehörigen Anbauflächen befinden sich auf einer Höhe von ca. 715 m über dem Meeresspiegel und sind von einem

großen Waldgebiet umgeben (siehe **Abbildung 1**). Da der Betrieb eine nachhaltige und ökologische Philosophie verfolgt, werden die Futtermittel für die Schweine soweit möglich im Eigenanbau vor Ort produziert oder von lokalen Anbietern zugekauft.

Die Schweine können sich auf dem Gelände des Betriebes, innerhalb ihres Geheges frei bewegen und *ad libitum* die angebotene Nahrung und das zur Verfügung stehende Wasser aufnehmen. Auf **Abbildung 2** ist der Schweinehof Scherm mit den dazugehörigen Ställen, Außengehegen und Weiden zu sehen.

D. Strontium und seine stabilen Isotope in Geosphäre, Hydrosphäre und Biosphäre

Strontium gehört zu den Erdalkalimetallen, besitzt die Atomzahl 38 und die Wertigkeit +2 (Capo et al. 1998). Das Element ist in der Natur allgegenwärtig und eines der am weitesten verbreiteten Spurenelemente in Gesteinen und Oberflächenablagerungen (Capo et al. 1998, ATSDR 2004). Der Ionenradius des Elements ist mit 1.32 Å nur geringfügig größer als der von Calcium, weswegen Sr^{2+} in der Natur für Ca^{2+} in geologischen und biologischen Mineralien substituiert (Faure 1977, Bentley 2006). Es handelt sich bei Strontium um ein hochgradig reaktives Element, welches schnell Oxide bildet und deswegen in der Regel nicht frei in der Natur auftritt, sondern als Bestandteil von Mineralen wie SrSO_4 oder SrCO_3 (ATSDR 2004, Nielsen 2004).

Bei schweren Elementen wie Strontium (mit einer atomaren Masse über 50 u) sind Gleichgewichts- oder kinetische Fraktionierungsprozesse aufgrund der relativ gesehen geringen Masseunterschiede bei in der Natur auftretenden Temperaturen weitestgehend vernachlässigbar (Bentley 2006, Hoefs 2008, Frei & Frei 2011, Minami & Suzuki 2018). Die Verhältnisse der verschiedenen Isotope von Strontium verändern sich also durch natürliche Prozesse nicht signifikant und bleiben auch über Trophieebenen hinweg unverändert, bzw. sind potentiell auftretende Veränderungen so gering, dass sie deutlich unterhalb des Messfehlers liegen (Blum et al. 2000, Flockhart et al. 2015). Bei Strontium werden diese Isotopenverhältnisse nicht auf einen Standard bezogen, sondern absolut angegeben (Price et al. 2002, Grupe et al. 2015). Strontium besitzt vier stabile Isotope, die in der Natur in verschiedener Häufigkeit auftreten (^{84}Sr (~0.56%), ^{86}Sr (~9.87%), ^{87}Sr (7.04%) und ^{88}Sr (~82.53%)) (Comar & Wasserman 1964, Capo et al. 1998, Bentley 2006). Für Studien zu geografischer Herkunft wird in der Regel das Verhältnis von ^{87}Sr und ^{86}Sr untersucht, wobei es sich bei ^{87}Sr um ein radiogenes Isotop handelt, das durch den radioaktiven Zerfall von ^{87}Rb entsteht (Banner 2004, Bentley 2006). Der Ursprung des Strontiums liegt in der zugrundeliegenden Geologie (Faure & Powell 2012, Bataille et al. 2014, Crowley et al. 2017).

Die generelle, weltweite Variation der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse beträgt etwa 0.700-0.750 (Price et al. 2002). Die Unterschiede scheinen zwar klein zu sein, sind aber signifikant und aus geologischer Sichtweise sehr groß. Sie überschreiten bei weitem den analytischen Fehler von Massenspektrometern, die zur Messung von Strontium-Isotopenverhältnissen eingesetzt werden. Er liegt für $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse bei ca. ± 0.00001 (Price et al. 2003). Über das Gestein gelangt das Strontium durch Verwitterungsprozesse zunächst in den Boden und die Hydrosphäre und über verschiedene Wege schließlich in die Biosphäre und die Bestandteile von Pflanzen und Tieren, wie in **Abbildung 3** und **Abbildung 4** dargestellt (Bentley 2006, Fry 2007, Tütken 2010, Crowley et al. 2017). Im Folgenden wird genauer auf die Prozesse und Faktoren eingegangen, welche die $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Isotopie in Geosphäre, Hydrosphäre, Biosphäre und im tierischen Organismus bestimmen. Danach werden die verschiedenen Einsatzmöglichkeiten der Strontiumisotopenanalyse und die Fachbereiche, in denen sie Anwendung finden, vorgestellt.

Abbildung 3 zeigt vereinfacht den Weg der stabilen Isotope von Strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) vom lokalen Grundgestein als Ursprungsquelle, über den Boden in Pflanzen und Tiere und schließlich den Endkonsumenten (in diesem Fall der Mensch) und seine mineralisierten Hartgewebe. Vereinfacht ist das Schema deswegen, weil hydrologische, atmosphärische und anthropogene Strontiumeinträge nicht verzeichnet sind.



Figure 1. Conservative isotope ratio throughout the food chain.

Abbildung 3 Der Strontiumkreislauf vom Grundgestein in den Körper durch verschiedene Materialien und Trophiestufen (Coelho et al. 2017). Nicht eingezeichnet sind nicht-geologische Quellen.

Diese Aspekte sind in **Abbildung 4** berücksichtigt. Wie zu erkennen ist, spielen zahlreiche Faktoren eine Rolle für das Zustandekommen der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse im Säugetier. Auf diese zugrundeliegenden Mechanismen soll in den folgenden Abschnitten näher eingegangen werden.

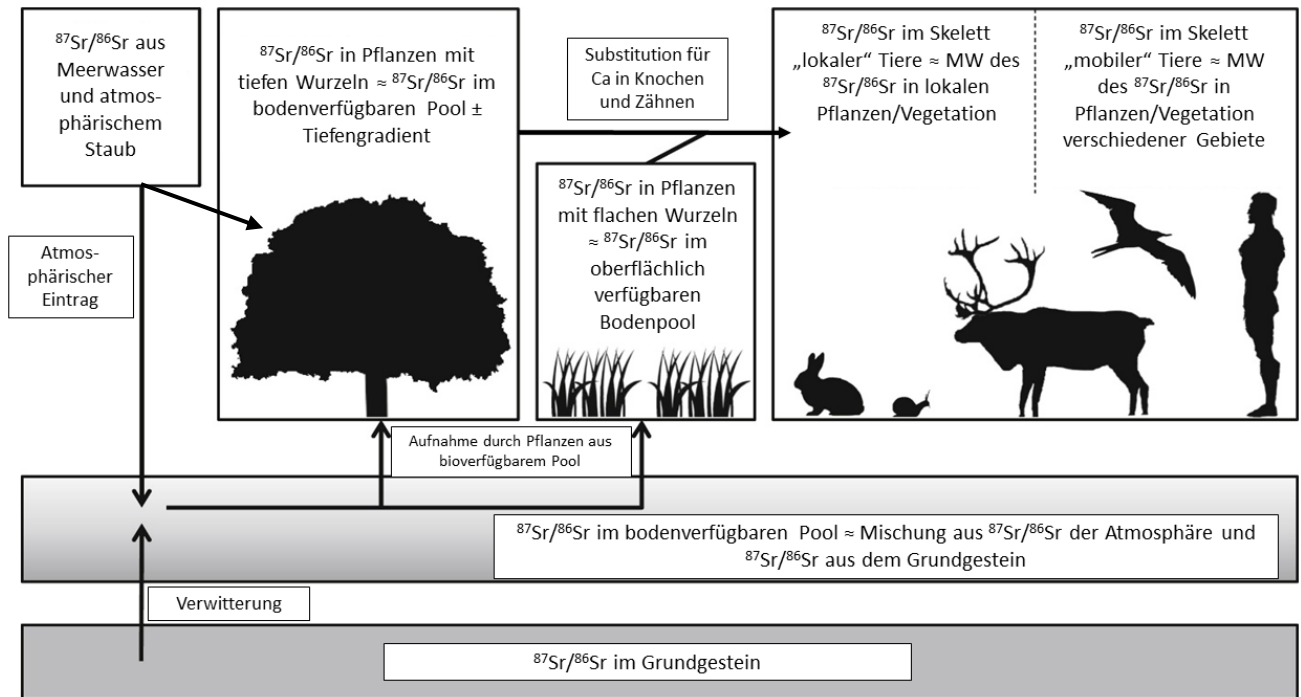


Abbildung 4 Geologische und atmosphärische Strontiumquellen in der Biosphäre und das Zustandekommen der lokalen $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Isotopie in Tieren und Menschen. Verändert nach Hajj et al. (2017).

1. Strontium in Gesteinen und Böden

Da es sich bei Strontium um ein lithophiles Element handelt, finden sich oft hohe Konzentrationen davon in Gesteinen. Dies gilt vor allem für solche Gesteinstypen, die reich an Calcium sind (z.B. Feldspat, Apatit, Kalzit und Dolomit), weil Sr^{2+} dort für Ca^{2+} substituiert (Philpotts & Schnetzler 1970, Waight 2015). Der Strontiumgehalt eines Gesteins hängt also von dessen Typ und Zusammensetzung ab. So sind Eruptivgesteine wie Basalt, Andesit und Dazit an Strontium angereichert, während ultramafische Gesteine nur wenig Strontium enthalten. Im Mittel liegt die Konzentration von Strontium in Gesteinen bei etwa 370 ppm, wobei immense Unterschiede von nur 1 ppm bis hin zu mehreren Prozent zwischen verschiedenen Gesteinen bestehen können (Capo et al. 1998).

Da ^{87}Sr radiogenen Ursprungs ist und durch den radioaktiven β -Zerfall von Rubidium (^{87}Rb) entsteht, verändert sich der Anteil dieses Isotops in einem Gestein über geologische Zeiträume hinweg (Coelho et al. 2017, Crowley et al. 2017). ^{87}Rb besitzt eine sehr lange Halbwertszeit von ca. 4.88×10^{10} Jahren (Bentley 2006). Diese ist so hoch, dass sie in geologischen Zeitspannen zwar zu signifikanten Veränderungen der $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$ -Verhältnisse und somit der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse führt (da der Anteil an ^{86}Sr über die Zeit hinweg stabil bleibt), die Verhältnisse in archäologischem und historischem Kontext jedoch als konstant angesehen werden können (Capo et al. 1998, Tütken 2010, Grupe et al. 2011). Deshalb hängt das $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Isotopenverhältnis eines Gesteins von dessen Ausgangskonzentrationen an Strontium und Rubidium, dem ursprünglichen $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Verhältnis, zu dem Zeitpunkt als das Gestein kristallisierte und seinem Alter ab (Åberg 1995, Price et al. 2002, Price et al. 2003, Faure & Mensing 2005, Bentley 2006, Faure & Powell 2012). Auf diese Weise lassen sich verschiedene Gesteine und damit auch geographische Gebiete (wenn sie von verschiedenen Grundgesteinen geprägt sind), nach ihren geologischen Strontiumisotopenverhältnissen voneinander unterscheiden. Dabei besitzen alte Gesteine mit hohen Rb/Sr-Ausgangskonzentrationen höhere Strontiumisotopenverhältnisse und junge Gesteine mit geringer Ausgangskonzentration niedrigere (Åberg 1995, Capo et al. 1998, Price et al.

2002, Price et al. 2003). Sehr alte Gesteine mit hohen ursprünglichen Rb/Sr-Verhältnissen haben in der Regel $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werte von mehr als 0.710, während sehr junge Gesteine mit niedrigen ursprünglichen Rb/Sr-Verhältnissen normalerweise unter 0.704 liegen (Bentley 2006). Die Sr-Konzentrationen und -isotopenverhältnisse in Gewässern, Böden, Pflanzen und Tieren hängen zu einem nicht unerheblichen Teil von der lokalen Geologie ab (Dasch 1969, Graustein 1989, Capo et al. 1998). Dieses bioverfügbare Strontium wird durch Verwitterungsprozesse aus dem Grundgestein gelöst (Sillen & Kavanagh 1982, Price 1989, Bentley 2006).

Obwohl bei $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ keine natürliche Fraktionierung auftritt, stimmen die Isotopenverhältnisse des Gesteins in der Regel nicht direkt mit dem Strontium in der Biosphäre überein (Crowley et al. 2017). Das liegt daran, dass Verwitterung eine komplexe Funktion mehrerer Faktoren ist. Dazu gehören die Konzentration des jeweiligen Elements in den verschiedenen Mineralien eines Gesteins, die Anteile der jeweiligen Mineralien selbst, die Stabilität der Mineralien gegenüber Verwitterungsreaktionen, die Löslichkeit des Elements in Wasser und die Kompatibilität des Elements in sekundären Mineralphasen (Borg & Banner 1996). Die meisten Gesteinsarten sind heterogen und bestehen aus verschiedenen mineralischen Phasen, die sich in ihren Strontiumkonzentrationen, Strontiumisotopenverhältnissen und Verwitterungsraten teilweise drastisch unterscheiden können und damit unterschiedlich zur Komposition des bioverfügbaren Strontiumpools beitragen (Fullagar et al. 1971, Capo et al. 1998, Bentley 2006, Burton & Price 2013). Strontium, das durch Verwitterung ins Boden- und Grundwasser gelangt, ist also eine nicht gleichmäßige Mischung aus diesen mineralischen Bestandteilen, wobei diejenigen Fraktionen, welche leichter verwittern, einen größeren (meist aber nicht direkt mess- oder berechenbaren, oder zumindest oft unbekannten) Einfluss haben, ebenso wie Fraktionen mit deutlich höheren Strontiumkonzentrationen (Price et al. 2002, Bentley et al. 2004). Hinzu kommt, dass an einem Standort mehrere Gesteinsarten vorkommen und auch ortsfremde Böden und Sedimente eine Rolle spielen können (Bentley 2006, Crowley et al. 2017).

Aus dem Gestein gelangt das Strontium zunächst in Böden und das Grundwasser. Böden können über Jahrzehnte bis Jahrtausende Strontiuminputs aus den verschiedenen Quellen integrieren (Crowley et al. 2017). Die Strontiumkonzentration von Böden liegt im Mittel bei etwa 240 ppm, kann aber auch zwischen 10 ppm und 1000 ppm betragen (Capo et al. 1998). Für die isotopische Zusammensetzung von Böden spielt unter anderem die Korngrößen des Sediments eine Rolle, weil sie die Angriffsfläche für die weitere Verwitterung bestimmt. Neben der Mineralverwitterung kann das Strontium in Böden auch aus dem Grundwasser oder Fließgewässern, aus atmosphärischer Ablagerung oder modernen anthropogenen Quellen, wie Düngemitteln stammen (Åberg et al. 1989, Graustein 1989, Borg & Banner 1996). $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ist deshalb auch eine Funktion der Bodentiefe, weil in den oberen humusreichen Schichten nicht-geologische Quellen einen größeren Einfluss haben können (Åberg et al. 1990, Åberg 1995, Probst et al. 2000). Price et al. (2002) geben zwar an, dass Böden oft einen relativ guten Mittelwert der verschiedenen mineralischen Phasen eines Gesteins abbilden, insgesamt ist es aber meistens sehr schwer abzuschätzen, welche Anteile einzelne Quellen zur isotopischen Zusammensetzung des Bodens haben (Borg & Banner 1996). Böden stellen also gewissermaßen die Schnittstelle zwischen Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre dar (Capo et al. 1998).

2. Strontium in Gewässern und Niederschlag

In Wasser finden sich gewöhnlich nur vergleichsweise geringe Mengen an Strontium, wo es in der Regel in gelöster Form vorliegt (Schroeder et al. 1972, Wadleigh et al. 1985, ATSDR 2004). In der Hydrosphäre können bezüglich der Strontiumisotopenverhältnisse signifikante Unterschiede zwischen verschiedenen Gewässertypen auftreten, je nachdem aus welchen Quellen diese sich zusammensetzen (Burton & Price 2013).

Da Strontium, das durch Verwitterung aus Gestein und Boden gelöst wird, so zunächst meist auch ins Boden- und Grundwasser gelangt, sind viele lokale Wasserquellen auch stark von geologischen Einflüssen bestimmt (Åberg et al. 1989). Im Wasser gelöst, oder über den Transport von Sedimenten, gelangt das so mobilisierte Strontium über Fließgewässer auch in andere Gebiete und schließlich ins Meer (Capo et al. 1998). Dort ist Strontium das häufigste Spurenelement mit einer Konzentration von etwa 8 ppm (Schroeder et al. 1972, Capo et al. 1998). Meerwasser besitzt im gesamten Zeitraum des Phanerozoikums eine relativ konstante $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Zusammensetzung (DePaolo & Ingram 1985, McArthur et al. 2001). Da die Verweildauer von Strontium im Meer (Jahrmillionen) sehr viel höher ist als die Vermischungsdauer (Jahrtausende), ist die Isotopie in allen Weltmeeren auch räumlich betrachtet sehr homogen und konstant (Holland 1984, Wadleigh et al. 1985, Faure & Powell 2012). Dabei werden die gesamten Einflüsse der verwitterten Kontinentalkruste im Meerwasser zu einem Wert von ca. 0.7092 gemittelt (Åberg 1995, Bentley 2006). Niederschläge weisen oft $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse auf, die dem von Meerwasser entsprechen oder zumindest stark ähneln (Capo et al. 1998). Mit steigender Entfernung vom Meer steigt jedoch der potentielle Einfluss (natürlicher oder anthropogener) terrestrischer Staubquellen im lokalen Niederschlag (Montgomery et al. 2007, Faure & Powell 2012). Niederschlagswasser weist sehr geringe Konzentrationen an Strontium von weniger als 1-2 ppb auf, allerdings können örtlich durch moderne Faktoren auch teilweise höhere Konzentrationen auftreten. In bestimmten Fällen kann es vorkommen, dass der atmosphärische Strontiumeintrag durch Niederschlag, Staub oder Aerosole einen dominanten Einfluss auf lokale Pflanzen ausübt (Hurst & Davis 1981, Poszwa et al. 2004).

Natürlicher Staub, der sich auf die Isotopie des Niederschlags auswirkt, sollte in der Regel mit den lokalen geologischen Bedingungen übereinstimmen. In bestimmten Fällen kann er aber auch über sehr weite Strecken transportiert werden (Biscaye et al. 1974, Wickman & Åberg 1987, Capo et al. 1998). Lokale Oberflächengewässer, aber auch das Grundwasser setzen sich isotopisch also sowohl aus dem Strontium zusammen, welches aus dem örtlichen Grundgestein gelöst wird, als auch aus anderen Quellen, wie dem Niederschlag, Staub oder anthropogenen Kontaminationen (Capo et al. 1998, Jørgensen et al. 1999). Die Zusammensetzung von Wasserkörpern kann dabei auch saisonal oder über längere Zeiträume hinweg schwanken, wenn sich beispielsweise die Einträge (z.B. Schneeschmelze) oder die Verwitterungsfaktoren (z.B. Änderung von Wasserläufen) ändern (Curtis Jr & Stueber 1973, Douglas et al. 2002, Price et al. 2002, Burton & Price 2013, Douglas et al. 2013). Im Boden gespeichertes Wasser ist bezüglich seiner Strontiumisotopenverhältnisse eine Funktion der Bodentiefe, weil atmosphärische und anthropogene Quellen in oberen Bodenschichten eine größere Rolle spielen (Capo et al. 1998). Typische Konzentrationen von löslichem Strontium im Bodenwasser sind 0.2-20 ppm (Capo et al. 1998).

Fließgewässer können $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Signaturen von einem Ort zum anderen transportieren und dadurch Isotopien in ein Gebiet bringen, die nicht mit der dortigen Geologie übereinstimmen. So können sie beispielsweise Strontium aus höheren Lagen in die Täler bringen (Bentley 2006, Frei & Frei 2011). Im weltweiten Mittel besitzen Flüsse eine Strontiumkonzentration von 0.06 ppm, mit Variationen zwischen 0.006 und 0.8 ppm (Capo et al. 1998). In höheren Lagen mit vermehrter Verwitterungsrate liegen $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ von Gestein und Flusswasser oft näher zusammen, während diese Verbindung in

niedrigen Lagen immer verwaschener wird, weil sich die Einträge verschiedener Gesteine über die Fließdistanz hinweg vermischen und der Niederschlag, sowie anthropogene Verschmutzungen eine zunehmende Rolle spielen. Darüber hinaus spielt auch die Fließgeschwindigkeit eine Rolle, weil bei hohen Flussraten mehr Strontium aus dem Gestein gelöst werden kann (Åberg 1995, Bentley 2006). Des Weiteren tendieren Flüsse mit hohen Fließgeschwindigkeiten auch dazu eine geringere isotopische Varianz aufzuweisen (Åberg et al. 1990).

Es kann also an ein und demselben Ort vorkommen, dass verschiedene Wasserquellen auch unterschiedliche $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werte aufweisen. In solchen Fällen muss dies bei Untersuchungen an lokalen Organismen berücksichtigt werden (Burton & Price 2013). Außerdem spielen in vielen Wasserquellen auch solche Faktoren eine Rolle, die nicht unmittelbar mit den vor Ort vorherrschenden geologischen Verhältnissen übereinstimmen (Montgomery et al. 2007).

3. Anthropogene Strontiumquellen

Besonders im modernen Kontext müssen neben natürlichen Strontiumquellen auch anthropogene Einflüsse als potenzielle Faktoren für das Ökosystem betrachtet werden (Böhlke & Horan 2000, Probst et al. 2000, Frei & Frei 2011). So können zum Beispiel moderne Düngemittel oder industrielle Staubquellen und Aerosole die Isotopie des bioverfügbaren Strontiums beeinflussen (Åberg 1995, Åberg et al. 1998, Kanayama et al. 2002, Höllriegl & München 2011).

Besonders im Bereich moderner Landwirtschaft können Agrardünger einen signifikanten Einfluss auf Boden und Grundwasser haben (Vitòria et al. 2004, Bentley 2006, Hosono et al. 2007). Laut Borg & Banner (1996) weisen dabei vor allem phosphatbasierte Dünger hohe Konzentrationen an Strontium auf, während Stickstoff- oder Kalium-Dünger eher geringe Mengen enthalten. Die atmosphärischen Quellen können beispielsweise durch Ascheemissionen der Kohle- oder Ölverbrennung verändert werden. Die Staubpartikel fallen aus der Luft dann entweder alleine, oder mit dem Niederschlag zu Boden, wo sie sich in Böden und Gewässern mit dem bereits vorhandenen Strontium vermengen (Capo et al. 1998, ATSDR 2004). Es gibt Hinweise darauf, dass dieses (anthropogene) atmosphärische Strontium für Pflanzen teilweise besser verfügbar ist, als Strontium aus dem Boden (Hurst & Davis 1981). Auch die Verwendung von Kalk (z.B. zum Kalken von Wäldern) oder Baustoffen wie Beton oder Zement können lokal die natürliche Isotopie verändern (Burton & Price 2013).

In manchen Fällen können solche künstlichen Einträge über den Boden oder die Atmosphäre sogar einen dominierenden Einfluss auf die gesamte isotopische Zusammensetzung der Biosphäre haben (Négrel & Deschamps 1996, Probst et al. 2000). Meist aber bestimmen trotzdem geologische Quellen die lokalen $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse (Sanusi et al. 1996, Bentley 2006). Bei domestizierten Tieren können außerdem nicht-lokale Futtermittel eine Rolle spielen (Böhlke & Horan 2000).

4. Strontium in Ökosystemen und Lebewesen

Strontium ist als Spurenelement in allen Lebewesen der Biosphäre vorhanden (Bowen 1966). Nachdem es durch die zuvor beschriebenen Prozesse mobilisiert und bioverfügbar gemacht wurde, kann es von Pflanzen und Tieren aufgenommen werden (Coelho et al. 2017, Crowley et al. 2017). Es folgt dabei Calcium aufgrund seiner großen chemischen Ähnlichkeit auf den entsprechenden Stoffwechselwegen und substituiert so für Ca^{2+} bei der Aufnahme in den Organismus, der internen Verteilung und der Exkretion von Pflanzen und Tieren (Elias et al. 1982, Graustein 1989, Sillen 1992, Gierth et al. 1998).

Allerdings verfügen Organismen über die Fähigkeit, Calcium gegenüber Strontium bevorzugt aufzunehmen bzw. Strontium verstärkt auszuscheiden. Diese Diskriminierung von Strontium führt dazu, dass das Sr/Ca-Verhältnis mit jeder Trophiestufe immer weiter abnimmt, was auch als Biopurifikation von Calcium bezeichnet wird (Elias et al. 1982, Burton et al. 1999, Blum et al. 2000, Price et al. 2002).

Pro Trophieebene (Boden – Pflanze – Herbivore – Karnivore) sinkt das Sr/Ca-Verhältnis dabei in etwa um den Faktor fünf (Burton & Wright 1995, Bentley 2006, Coelho et al. 2017). Dies spielt insofern eine Rolle für die isotopische Zusammensetzung eines Organismus, als die Strontiumkonzentrationen einzelner aufgenommener Quellen bestimmen, welche Mischung im entsprechenden Konsumenten entsteht. Falls sich einzelne Quellen in ihren $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnissen unterscheiden, ist deren Strontiumgehalt ausschlaggebend für die Isotopie des Gewebes, das sich aus den jeweiligen Quellen speist (Burton & Wright 1995, Price et al. 2002). Die Varianz der Strontiumkonzentrationen eines bestimmten Materials an einem Standort nimmt ebenfalls mit steigender Trophieebene, von etwa 145 % in Böden auf ca. 20 % in Karnivoren, ab (Burton et al. 1999, Price et al. 2002, Burton et al. 2003). Die Konzentrationen selbst folgen allerdings keinem solchen generellen Muster, da bestimmte biologische Materialien Strontium (bzw. Calcium) auch akkumulieren können (Bentley 2006, Crowley et al. 2017).

Beim Zustandekommen von $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnissen in organischen Materialien spielen Fraktionierungsprozesse keine Rolle, wie mittlerweile auch experimentell nachgewiesen wurde. Das bioverfügbare Strontium ändert seine Isotopie also nicht auf dem Weg durch die Nahrungskette (Hurst & Davis 1981, Åberg 1995, Bentley 2006, Drivelos & Georgiou 2012, Flockhart et al. 2015). Meist sind die Umweltbedingungen an einem Standort jedoch komplex, sodass eine gewisse Variabilität an bioverfügbarem $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ durch Variation geologischer, atmosphärischer, anthropogener oder sonstiger Strontiumquellen zustande kommt (Price et al. 2014, Crowley et al. 2017). Diese lokale Variation wird von verschiedenen Materialien unterschiedlich stark integriert und gemittelt. Die Varianz von lokalen Strontiumisotopenverhältnissen wird infolgedessen ebenfalls mit aufsteigender Trophieebene dramatisch eingeengt (Chamberlain et al. 1996, Blum et al. 2000). Diese Art der Biopurifikation ist darauf zurückzuführen, dass beispielsweise herbivore Tiere eine Mischung aus allen lokalen Bodentiefen, Pflanzen und Wasserquellen konsumieren, wodurch sich ein relativ stabiler Mittelwert dieser Materialien (und den zugrundeliegenden geologischen, anthropogenen und atmosphärischen Verhältnissen) bildet (Graustein & Armstrong 1983, Burton et al. 1999, Price et al. 2002, Bentley et al. 2004, Tütken 2010). Die geologische $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Variation an einem Standort ist also um ein Vielfaches höher als die der lokalen Pflanzen und Tiere und auch innerhalb der Biosphäre wird die Bandbreite immer weiter eingeengt, je nachdem über welche Flächen und Zeiträume ein bestimmtes Material integriert (Burton & Price 2013). So beträgt die weltweite Variation von $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in menschlichem Zahnschmelz laut Burton & Price (2013) mit etwa 0.012 (0.7047 bis 0.7190) nur einen Bruchteil der geologischen Variabilität. Als ungefähren Richtwert für die lokale Variabilität der stabilen Strontiumisotopenverhältnisse von Tieren und Menschen an einem Standort wird von den Autoren eine Schwankung von weniger als ± 0.0003 angegeben. Das Wissen darüber, wie genau die räumliche (und zeitliche) Mittelung verschiedener Quellen verläuft und inwieweit verschiedene biologische Materialien (oder auch verschiedene Arten) sich dabei voneinander unterscheiden, ist noch relativ begrenzt (Crowley et al. 2017). Generell lässt sich aber sagen, dass biologisch verfügbares Strontium und somit Strontium in Pflanzen und Tieren sich maßgeblich von den $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnissen des Grundgesteins (und deren Variation) unterscheiden kann (Price et al. 2002, Meiggs 2007). Zu Unterschieden kann es nicht nur aufgrund nicht-geologischer Quellen kommen, sondern auch durch die unterschiedliche Integration der örtlichen Variation in Abhängigkeit von den jeweiligen Konzentrationen und physiologischen Prozessen, welche diese beeinflussen (Montgomery et al. 2007).

a) *Strontium in Pflanzen*

In Pflanzen hat Strontium keine bekannte metabolische Funktion. Trotzdem wird es von ihnen leicht aus dem Boden über die Wurzeln aufgenommen und gelangt auch in andere Pflanzenteile, wie Blätter, Samen und Früchte (Höllriegl & München 2011). Das Strontium in Pflanzen kann sowohl vom zugrundeliegenden Grundgestein, als auch von der Atmosphäre bestimmt sein (Hodell et al. 2004, Poszwa et al. 2004, Frei & Frei 2011). Die Vegetation nimmt das Strontium dabei aus dem bioverfügbaren Bodenaustauschkomplex und im Bodenwasser gelöstes Strontium auf (Capo et al. 1998). In Bergregionen können bis zu 50 oder sogar 75 % des Strontiums in Pflanzen aus atmosphärischem Eintrag (Schwebstoffe aus der Luft, Staub, Niederschlag) stammen (Graustein & Armstrong 1983, Miller et al. 1993). Auch bestimmte Pflanzenarten nehmen einen Großteil ihres Strontiums bevorzugt aus atmosphärischen Quellen auf (Gosz et al. 1983). Trotzdem hat die Gesteinsverwitterung in der Regel meist noch den größten Einfluss, selbst in Regionen mit durch anthropogene Quellen stark verunreinigten Niederschlägen (Ericson 1985, Sanusi et al. 1996). Auch bei Pflanzen gilt, dass keine Fraktionierung bei der Aufnahme vom Boden bzw. Wasser in die Pflanze stattfindet. Allerdings spielt die Löslichkeit des Strontiums in den jeweiligen Phasen eine Rolle dabei, wie gut es von den Pflanzen aufgenommen werden kann, wodurch die Isotopie des Bodens nicht notwendigerweise jener der darauf wachsenden Pflanzen entspricht (Sillen et al. 1998, Schweissing & Grupe 2003). Außerdem zeigen auch Pflanzen bereits einheitlichere $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werte, weil sie das bioverfügbare Strontium der Böden mitteln und so deren Bandbreite einengen (Sillen & Sealy 1995, Sillen et al. 1998, Bentley 2006). Da die isotopische Zusammensetzung des Bodens eine Funktion der Bodentiefe ist, spielt für die $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse in Pflanzen auch deren Wurzeltiefe eine Rolle: je tiefer die Wurzeln, desto größer wird der Einfluss des Grundgesteins und desto geringer wird der Einfluss der Atmosphäre (Åberg et al. 1990, Poszwa et al. 2002, Dijkstra et al. 2003, Crowley et al. 2017). Ein ähnlicher Trend gilt für Pflanzen, die in der Nähe von Fließgewässern wachsen. Der Einfluss der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werte der Fließgewässer sinkt mit steigendem Abstand der Pflanze vom Gewässer und der Einfluss des lokalen Bodens steigt entsprechend (Price et al. 2002). Die typische Konzentration von pflanzenverfügbarem Strontium im Boden liegt bei ca. 0.22 ppm (Åberg et al. 1990, Capo et al. 1998, Bentley 2006). Die Boden-Pflanze-Purifikation der Sr/Ca-Verhältnisse ist besonders stark ausgeprägt. Wie stark dabei gegen Strontium diskriminiert wird, variiert jedoch von Art zu Art, je nach Standort und auch zwischen verschiedenen Pflanzenteilen (Gierth et al. 1998, Burton et al. 1999, Poszwa et al. 2004, Meiggs 2007).

b) *Strontium im tierischen Organismus*

Auch in Säugetieren sind für Strontium keine essenziellen biochemischen Funktionen nachgewiesen (Schroeder et al. 1972, Rosenthal 1981, Burton & Wright 1995, Blum et al. 2000). Es folgt jedoch, wie in der übrigen Biosphäre auch, Calcium auf allen entsprechenden Stoffwechselwegen, substituiert für diesen hochessentiellen Mineralstoff in diversen Körpergeweben und ist somit auch ein allgegenwärtiges Spurenelement im Säugetierkörper (Bryant & Loutit 1964, Elias et al. 1982, Burton & Wright 1995, Grupe et al. 1997, ATSDR 2004, Meiggs 2007, Coelho et al. 2017). Das Verhalten und die Verteilung von Strontium in Säugetieren, sowie die relevanten Inputs, Outputs und Stoffwechselprozesse sind vor allem am Menschen, im Kontext medizinischer Studien und bezüglich der Folgen des radioaktiven Isotops ^{90}Sr studiert worden (Bedford et al. 1960, Widdowson et al. 1960, Carr et al. 1962, Bryant & Loutit 1964, Schroeder et al. 1972). Es existieren aber auch einige Publikationen zu Kleinsäugetern, Schweinen und anderen Arten (MacDonald et al. 1956, Hogue et al. 1961, McClellan 1964, Dahl et al. 2001, Meiggs 2007, Lewis et al. 2017). Generell ist Strontium und

dessen stabile Isotope in Tieren eine Funktion der Umgebungsbedingungen und der Ernährungsweise (Capo et al. 1998, Coelho et al. 2017).

Tiere sind dafür bekannt, über ihre Lebenszeit hinweg einen sehr einheitlichen Mittelwert der Isotopenverhältnisse ihrer Umgebung in Skelett- bzw. Körpergeweben abzubilden (Burton et al. 1999, Blum et al. 2001, Price et al. 2002). Wie stark die $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse einer Population an einem bestimmten Standort variieren, hängt neben den Außenbedingungen auch von der jeweiligen Tierart und dem Typ des beprobten Gewebes ab. So können im historischen Kontext Rinder, die auf größeren Flächen weiden, eine höhere Variabilität aufweisen als z.B. Schweine, deren Mobilität meist auf einen engeren Radius beschränkt ist. Schweine werden deswegen, und auch aufgrund ihrer Ähnlichkeit zum Menschen, was beispielsweise Aminosäurebedarf und Ernährung angeht, gerne als lokale Referenz verwendet (Hare et al. 1991, Howland et al. 2003, Bentley 2006). Die grundsätzlichen Strontiumflüsse im Säugetierkörper sind grob in **Abbildung 5** dargestellt und werden im Folgenden näher erläutert.

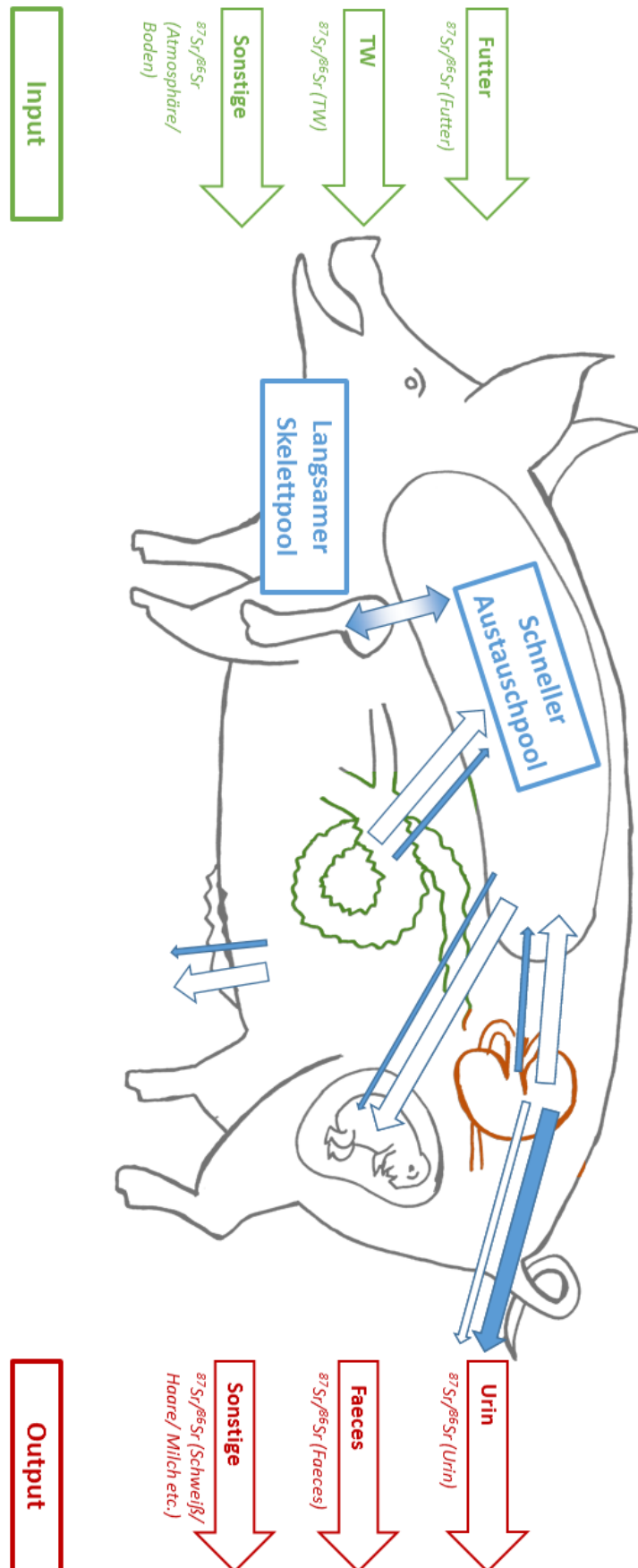


Abbildung 5 Strontium- (blau) und Calciumflüsse (weiß) im tierischen Organismus. Inputs (grün), Outputs (rot) und solche Reaktionen, die zu einer Diskriminierung von Strontium zugunsten von Calcium führen (blaue und weiße Pfeile).

(1) Strontiuminputs und Aufnahme in den Körper

Die Aufnahme von Strontium in den Körper erfolgt in erster Linie über die Nahrung und das Trinkwasser (Likins et al. 1960, Graustein 1989, Coelho et al. 2017). Über die Atmung aufgenommenes Strontium und die Aufnahme von Boden oder Staub kann hingegen meist vernachlässigt werden (Schroeder et al. 1972, ATSDR 2004). Je nach Strontiumkonzentrationen von Trinkwasser und Nahrung kann jeweils der eine oder andere Input die Zusammensetzung des Körpers bestimmen. So kann das Trinkwasser, je nach Konzentrations- und Mengenverhältnis von Trinkwasser zu Futter, eine sehr geringe (0.2%) oder große (>60%) Rolle als täglicher Strontium-Input spielen (Schroeder et al. 1972, Frei & Frei 2011). In der Regel sind im (Trink-)Wasser jedoch deutlich niedrigere Mengen an Strontium zu finden, weswegen selbst in Tieren mit hoher Trinkrate meist dem Futter der größte Einfluss auf die körperinterne Strontiumzusammensetzung zukommt.

Laut einer Fütterungsstudie von Lewis et al. (2017) umfasst das Trinkwasser im Mittel sogar lediglich 1.2 % (maximal 5 % im Einzelfall) des täglichen Gesamtstrontiuminputs von in Gefangenschaft gehaltenen Hausschweinen. Dem Futter kommt also ein maßgeblicher Einfluss zu. Dabei spielt der jeweilige Calcium- bzw. Strontiumgehalt der einzelnen Futterquellen eine entscheidende Rolle: insbesondere pflanzliche Futterbestandteile, wie Getreide und Blattgemüse, aber auch Milchprodukte tragen disproportional stark zur Mischung im Körper bei, andere Futterquellen mit niedrigen Ca- bzw. Sr-Konzentrationen dagegen teilweise kaum messbar (Elias et al. 1982, Burton & Wright 1995, Burton & Price 2000, ATSDR 2004, Montgomery et al. 2007, Buzon & Simonetti 2013). So kann Nahrung mit hohen Strontiumkonzentrationen den Beitrag von Nahrung mit geringerem Mineralanteil verschleiern, weil die Zusammensetzung des Körpers sehr sensibel darauf reagiert (Ericson 1989, Burton & Wright 1995).

Calcium und Strontium werden nach der Aufnahme mit dem Futter und Trinkwasser von calciumaffinen Proteinen gebunden und so durch die Darmschleimhaut transferiert. Da diese Proteine eine geringere Affinität zu Strontium besitzen als zu Calcium, kommt es hier zu einer signifikanten Diskriminierung von Strontium gegenüber Calcium im Verdauungstrakt (Comar et al. 1957, Ingersoll & Wasserman 1971, Menczel & Mor 1972, Sillen & Kavanagh 1982, Dahl et al. 2001, Nielsen 2004). Wie stark diese Diskriminierung ausfällt, hängt unter anderem von Faktoren wie dem Alter, dem Calciumgehalt der Nahrung und Schwangerschaft bzw. Stillzeit ab (Bryant & Loutit 1964, Sillen & Kavanagh 1982). In adulten Säugetieren werden nur etwa 10 bis 40 % des konsumierten Strontiums auch tatsächlich physiologisch absorbiert, während es bei Calcium ca. 40-80 % sind (Comar et al. 1957, McClellan 1964, Burton et al. 1999, Burton et al. 2003). Laut Burton & Wright (1995) sinkt das Sr/Ca-Verhältnis beim Passieren der Darmwand um ca. 80 %. Das Alter ist deshalb von Bedeutung, weil junge Individuen (vor allem bei der Aufnahme über den Darm) noch nicht im selben Ausmaß Calcium gegenüber Strontium bevorzugen können, wie adulte (Braithwaite & Riazuddin 1971). Jungtiere nehmen also Strontium aus der konsumierten Nahrung in höherer Rate über den Darmtrakt auf, was möglicherweise auf den erhöhten Calciumbedarf im Zuge des Knochenwachstums zurückzuführen ist (Bedford et al. 1960, Loutit 1961, Bryant & Loutit 1964, McClellan 1964, Sillen & Kavanagh 1982, Blum et al. 2000). Allerdings kommt es bei der Produktion von Milch in den Brustdrüsen zu einer zusätzlichen Diskriminierung seitens des Muttertieres, wodurch Milch, die von gestillten Individuen aufgenommen wird, selbst deutlich an Strontium abgereichert ist, obwohl sie reich an Calcium ist (Lough et al. 1963, Twardock 1963, Rehnberg et al. 1969, Rosenthal 1981, Sillen & Kavanagh 1982). Das Sr/Ca-Verhältnis der Milch beträgt laut Comar et al. (1957) nur 9 % des Sr/Ca-Verhältnisses der von der Mutter aufgenommenen Nahrung. Deswegen weisen die Körpergewebe von noch nicht abgestillten Individuen trotz noch nicht vollständig entwickelter Diskriminierung niedrigere Strontiumkonzentrationen auf (Sowden 1958, Sillen & Kavanagh 1982). Die Diskriminierungsrate sinkt

prinzipiell unabhängig vom Alter auch dann, wenn die konsumierte Nahrung nur sehr wenig Calcium enthält, wenn also ein Calciummangel besteht. Im Regelfall ist dieser Effekt aber zu vernachlässigen (Spencer et al. 1961, Macleod 1976). Auch die Plazenta diskriminiert gegen Strontium, weswegen Neugeborene in der Regel unter ansonsten gleichbleibenden Bedingungen die geringsten Sr/Ca-Werte in ihren Körpergeweben aufweisen (Comar et al. 1955, Hartsook & Hershberger 1973). Laut Bryant & Loutit (1964) wird (beim Menschen) die Sr/Ca-Diskriminierung zwischen Nahrung und Körper der Mutter in der Plazenta noch einmal fast verdoppelt. Comar et al. (1957) geben für Ratten an, dass das Sr/Ca-Verhältnis des Fötus auf 28 % gegenüber dem der Mutter sinkt und nur 17 % des Sr/Ca-Verhältnisses der von der Mutter konsumierten Nahrung beträgt.

(2) Strontiumoutputs und Exkretion

Die Exkretion von Strontium (und Calcium) erfolgt in erster Linie über den Urin. Das Strontium, welches sich im Faeces befindet, wurde zum größten Teil gar nicht in den Blutkreislauf aufgenommen und der Verlust über andere Körperflüssigkeiten, wie Schweiß oder Speichel, ist vernachlässigbar (Eisenberg & Gordan 1961, ATSDR 2004). Strontium wird vom tierischen Organismus nicht nur in verringerten Raten im Darmtrakt absorbiert, sondern auch vermehrt über die Nieren mit dem Urin ausgeschieden (Comar et al. 1957, Spencer et al. 1961, Bronner et al. 1963, Walser & Robinson 1963, Schroeder et al. 1972). Dabei erfolgt eine (gegenüber der von Calcium in etwa um das Dreifache) verringerte Reabsorption in den Nierentubuli, wodurch verhältnismäßig in etwa drei- bis fünfmal mehr Calcium im Körper zurückbehalten wird, als Strontium (Harrison & Raymond 1955, Bryant & Loutit 1964, Nielsen 2004). Neben der Diskriminierung an der Darmwand, ist dieser Mechanismus der zweite ausschlaggebende Prozess zur Veränderung der Strontiumquantitäten zwischen Tier und Umwelt bei adulten, nicht-gestillten und nicht-schwangeren Tieren (Harrison & Raymond 1955, MacDonald et al. 1956, Comar et al. 1957, Eisenberg & Gordan 1961, Dahl et al. 2001, Coelho et al. 2017). Er ist auch in jungen und neugeborenen Individuen bereits messbar aber ebenfalls noch nicht vollständig ausgeprägt (Widdowson et al. 1960, Dahl et al. 2001). Die vermehrte Ausscheidung von Strontium über die Nieren wird abgeschwächt, wenn heilende Frakturen vorliegen und neues Knochenmineral aufgebaut werden muss (MacDonald et al. 1956). In vernachlässigbarer Quantität diskriminieren auch die Schweißdrüsen und scheiden vermehrt Strontium aus (Eisenberg & Gordan 1961).

(3) Körperinterne Strontiumbewegungen

Über das Blut wird Strontium nach der Absorption im Körper verteilt und gelangt relativ leicht in Zellen und wieder heraus (ATSDR 2004). Bei körperinternen Reaktionen, wie beispielsweise Ionenaustauschprozessen im Zuge der Knochenbildung, kommt es zu keiner oder nur geringen Diskriminierung von Strontium gegenüber Calcium (Eisenberg & Gordan 1961, Bryant & Loutit 1964, Dahl et al. 2001). So haben Versuche an Kaninchen und Ratten mit dysfunktionalen Nieren gezeigt, dass intravenös verabreichtes Strontium und Calcium (welches demnach also auch nicht die Darmwand passieren musste) zu keinen signifikanten Veränderungen der Sr/Ca-Verhältnisse beim Einbau in das Knochenmineral führte (MacDonald et al. 1956, Talmage & Elliott 1958).

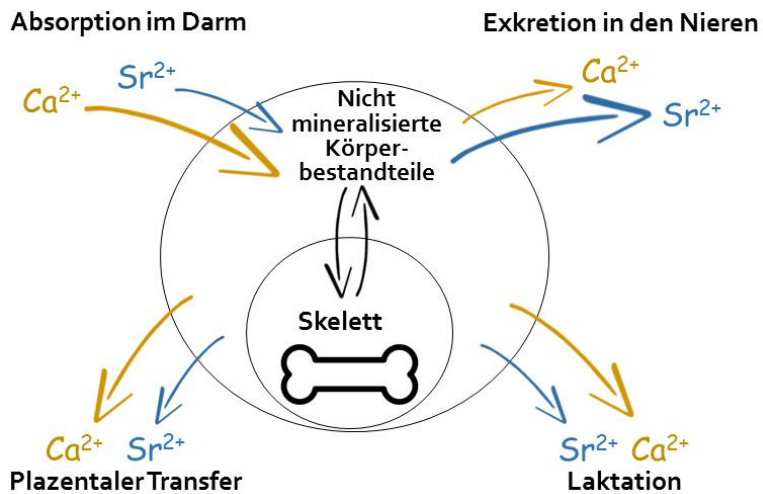


Abbildung 6 Hauptaufnahme- und -abgabewege von Strontium und Calcium im Säugetierkörper, bei denen die Diskriminierung von Strontium (blau) gegenüber Calcium (gelb) eine Rolle spielt. Diskriminierung findet bei der Aufnahme über die Darmwand, der Exkretion über die Nieren und beim Transfer durch die Plazenta bzw. bei der Produktion von Milch statt. Bei den Wechselwirkungen zwischen Skelett und den sonstigen Körperbestandteilen sind hingegen keine signifikanten Diskriminierungsprozesse bekannt.

Der Strontiumhaushalt eines Säugetieres wird also vorrangig bestimmt durch die Aufnahme von Strontium über den Darm und die Ausscheidung über die Nieren, bei beiden kommt es zu Diskriminierungsprozessen und Veränderungen des Sr/Ca-Verhältnisses (siehe **Abbildung 6**). Obwohl prinzipiell alle Nahrungsbestandteile gleichermaßen von dieser Diskriminierung betroffen sind, müssen bei gemischter Ernährungsweise die Konzentrationen der einzelnen Bestandteile berücksichtigt werden (Meiggs 2007). Die diskriminierenden Prozesse sind altersabhängig und während der Schwangerschaft und Stillzeit spielen außerdem noch Diskriminierungsvorgänge in Plazenta und Milchdrüsen eine Rolle (Schroeder et al. 1972). Laut Hogue et al. (1961) führen die kombinierten Diskriminierungen in Darm und Niere bei adulten Schweinen zu einem Verhältnis von 0.19 zwischen dem Sr/Ca-Verhältnis der aufgenommenen Nahrung und dem des Knochens. Ein ähnlicher Wert von 80 % Verringerung zwischen Nahrung und Konsument wird von Burton et al. (1999) angegeben. Bei neugeborenen Ferkeln bis zu einem Alter von sechs Wochen beträgt das Verhältnis zwischen Muttermilch und Knochen aufgrund verminderter Diskriminierungsrate 0.7 bis 0.8. Zwischen dem Alter von sechs Wochen und drei Monaten ist die Diskriminierungsfähigkeit dann bereits so weit ausgeprägt, dass das Verhältnis in dieser Zeit auf 0.4 sinkt (McClellan 1964). Je nachdem, welcher Lebensabschnitt eines Tieres von einem bestimmten Gewebe abgebildet wird, können diese (altersabhängigen) Faktoren zu Unterschieden in den Strontiumkonzentrationen zwischen verschiedenen Geweben führen. Auch die $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse von Geweben desselben Individuums können so variieren, zumindest wenn die Inputs an Strontium, die im Laufe der Lebenszeit aufgenommen werden sich isotopisch verändern. Knochen integriert beispielsweise die verschiedenen Inputs über große Zeiträume und kann durchaus sowohl Anteile aus der Stillzeit und dem Erwachsenenalter reflektieren, insbesondere bei schnell wachsenden Tieren wie Schweinen (Ericson 1985, Bentley et al. 2004, Grupe et al. 2015, Crowley et al. 2017). In solchen Fällen müssen, um die im Knochen vorhandene Mischung der Strontiumeinflüsse zu verstehen, das Knochenwachstum, die Turnoverrate und die unterschiedlich hohen Konzentrationen der Inputs in Abhängigkeit von Alter und Ernährung berücksichtigt werden (Loutit 1961, Price et al. 2002, Bentley 2006). Sowohl wachsender, als auch adulter Knochen wird kontinuierlich erneuert (Jowsey 1971, Price et al. 2002). Dabei wird Bioapatit von Osteoblasten auf- und von Osteoklasten abgebaut, wodurch es zu einem langsamen aber stetigen Wechsel der enthaltenen Elemente kommt (Bentley 2006). Die Remodeling-Raten sind je nach Knochentyp unterschiedlich (Tütken 2010). Der fortwährende Umbau des Knochens hat zur Folge, dass sich neue isotopische Einflüsse mit der Zeit im Knochenmineral bemerkbar machen.

Einleitung

Das $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis kann dabei als Funktion der Zeit beschrieben werden (Bentley 2006):

$$R_{\text{Knochen}}(t) = R_B - (R_B - R_A)e^{-t/\gamma}$$

Dabei ist $R_{\text{Knochen}}(t)$ das $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis des Knochens zum Zeitpunkt t und R_A bzw. R_B die $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse an den Orten A und B bzw. der unterschiedlichen Bedingungen A und B (zum Beispiel durch einen Futterwechsel). γ bezeichnet die Verweildauer von Strontium im jeweiligen Knochentyp, ist also eine Funktion der Turnover- bzw. Remodelingrate. Weichgewebe besitzen in der Regel zwar deutlich höhere Turnoverraten und reagieren dementsprechend schneller auf äußere Veränderungen als Knochengewebe, die Prinzipien für die graduelle Änderung der Isotopie lassen sich aber nicht nur auf Knochen, sondern auf alle Gewebetypen, die kontinuierlich umgebaut werden, übertragen (Dahl et al. 2001, Montgomery 2010). **Abbildung 7** zeigt, wie sich die Isotopie eines solchen Gewebes, das sich im stetigen Umbau befindet, nach einem Wechsel der Inputs über die Zeit hinweg verändert.

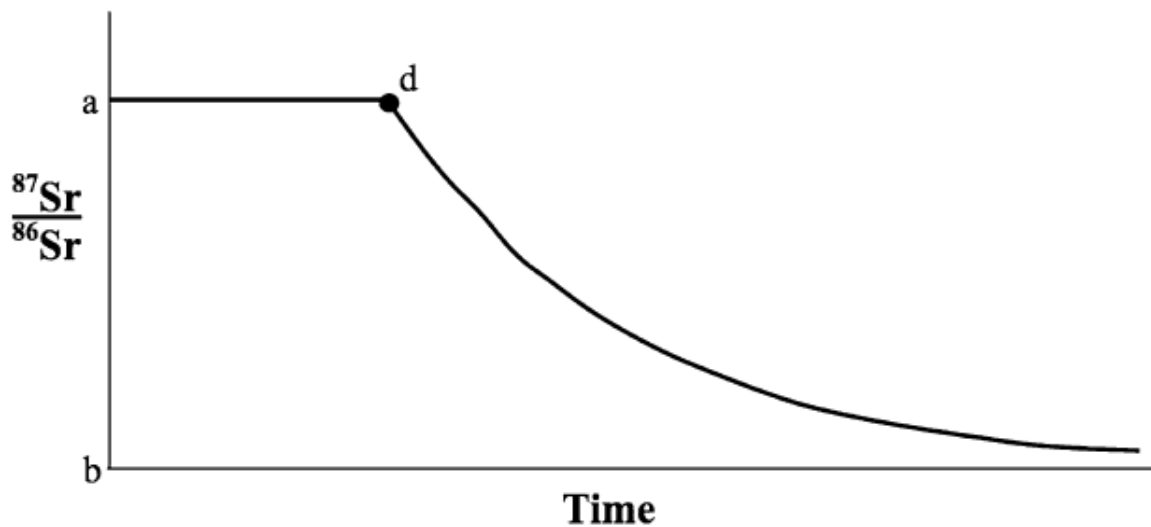


Abbildung 7 Graduelle zeitliche Veränderung der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse eines sich im stetigen Umbau befindlichen Gewebes nach Änderung der Strontiuminputs zum Zeitpunkt d von Input mit dem $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Wert a zu Input mit dem $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Wert b, welcher nach einer ausreichenden Zeit erreicht wird (Schweissing & Grupe 2003).

In den frühen Lebensphasen überwiegt beim Zustandekommen der Knochenkomposition noch die wachstumsbedingte Akkretion von neuer Knochenmasse, sodass sich (beim Menschen und je nach Knochentyp) die Zusammensetzung des Knochens pro Jahr fast vollständig umwandelt (Bryant & Loutit 1964, Dahl et al. 2001). Für Schweine ist von ähnlichen Bedingungen auszugehen. Bei erwachsenen Individuen (in denen keine Nettozunahme der Knochenmasse mehr stattfindet) werden pro Jahr etwa 2-3 % (Kompaktknochen) bzw. 8 % (Geflechtknochen) der Knochenmasse und damit auch des darin enthaltenen Strontiums ersetzt (Kulp & Schulert 1962, Bryant & Loutit 1964, Burton & Price 2013). Rippen und Wirbel wandeln sich dabei am schnellsten um, Langknochen (Femur: 2-5 % pro Jahr) und vor allem Teile des Schädelknochens (1-2 % pro Jahr) am langsamsten (Carr et al. 1962, Bryant & Loutit 1964).

Die Zahnschmelzmineralisation hingegen findet zu ganz bestimmten Zeiten im Leben eines Säugetieres statt (Montgomery et al. 2007, Slater et al. 2014, Waterman et al. 2014). Bei Schweinen beginnt sie je nach Zahntyp vor der Geburt und ist bei manchen Zahntypen (Milchzähne) sogar bereits vor der Geburt abgeschlossen. Die Zähne des Dauergebisses mineralisieren dann bis zum 2.-3. Monat (M1), 1.-8. Monat (M2, P3, P4) bzw. 3.-13. Monat (M3) (Hillson 2005). Nachdem der Zahnschmelz eines Zahnes sich gebildet hat, findet praktisch kein Remodeling mehr statt, sodass in den verschiedenen Zahntypen genau diejenigen Strontiumeinflüsse abgebildet werden, die in der jeweiligen Bildungszeit

vorherrschten (Hobson 1999, Meiggs 2007, Montgomery et al. 2007, Tütken 2010, Minniti et al. 2014, Price et al. 2014). Teilweise lassen sich an Zähnen so sogar saisonale Unterschiede in den $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnissen ablesen (Meiggs 2007).

Auch Haare stellen ein biologisch inertes Gewebe dar, sie verändern ihre (isotopische) Zusammensetzung nach der Bildung also nicht mehr weiter durch körperinternen Umbau (White 1993, Hobson 1999, Macko et al. 1999, O'Brien & Wooller 2007, Chau et al. 2017). Da es sich bei Haaren aber um einen externen Körperanhang handelt, der den natürlichen Außenbedingungen unmittelbar ausgesetzt ist, kann sich ihre chemische (und strontiumisotopische) Zusammensetzung durch externe Kontamination verändern (Vautour et al. 2015, Coelho et al. 2017). Dieses exogene Strontium kann durch geeignete Methoden aber wieder entfernt werden (Font et al. 2012, Tipple et al. 2013).

In **Tabelle 56** im Anhang findet sich eine Übersicht über die metabolischen Eigenschaften, Turnoverraten und Integrationszeiten der verschiedenen beprobten Gewebetypen.

Muttermilch wird aus dem Calcium- bzw. Strontiumpool der Mutter gespeist und setzt sich sowohl aus der von der Mutter zur Zeit der Laktation konsumierten Nahrung, als auch aus Calcium und Strontium zusammen, welches im Zuge des Remodelings aus dem Skelett gelöst wird. Laut Comar et al. (1957) spiegelt das Strontium der Milch aber fast ausschließlich die aktuelle Nahrungsaufnahme wider und kaum das schon im Skelett der Mutter vorhandene Strontium. Dasselbe gilt für Strontium im Fötus (ca. 92% des Calciums stammen aus der Nahrung, die die Mutter vorher gegessen hat).

Mengenmäßig befindet sich der bei weitem größte Teil des Strontiums im Körper in den mineralisierten Hartgeweben des Skeletts, also Knochen und Zähnen, wo es für Calcium, welches ein essentieller Hauptbestandteil des Knochenminerals ist, substituiert (Likins et al. 1960, Johnson et al. 1966, Graustein 1989, Ezzo 1994, Capo et al. 1998, Bentley 2006). Strontium wird deshalb auch als knochensuchendes Element bezeichnet. 99 % des körperinternen Strontiums sind dort im biologischen Apatit gebunden (Dahl et al. 2001, ATSDR 2004). Im Knochen beträgt die Strontiumkonzentration beim Menschen typischerweise 40 bis 1000 ppm, beim Zahnschmelz finden sich in der Regel etwas geringere Konzentrationen (Rosenthal 1981, Grupe et al. 1997, Schweissing & Grupe 2003). Im übrigen Körper sind die Konzentrationen an Strontium um ein Vielfaches geringer als in den mineralisierten Hartgeweben (Bentley 2006). Die niedrigsten Strontiumkonzentrationen finden sich in Herz und Leber (Schroeder et al. 1972). Während der große Calcium- bzw. Strontiumspeicher des Skelettgewebes sich träge verhält und sich also nur langsam verändert, ist das übrige wenige Strontium in den Weichgeweben und Körperflüssigkeiten deutlich aktiver und wird (mit Unterschieden zwischen einzelnen Gewebetypen) schneller ausgetauscht (Eisenberg & Gordan 1961). Der Körper produziert also eine Vielfalt biogeochemischer Speicher, die alle verschiedene Zeiträume widerspiegeln (Ericson 1985). Dies gilt es bei der Interpretation entsprechender $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Daten zu berücksichtigen.

5. Anwendung und Erforschung von stabilen Strontiumisotopen in verschiedenen Fachbereichen

Die Untersuchung der stabilen Isotope ^{87}Sr und ^{86}Sr wird bereits seit einigen Jahrzehnten in verschiedensten Fachbereichen durchgeführt und gilt als einer der nützlichsten geochemischen Tracer (Bentley 2006). Am längsten wird die Methode bereits in der Geochronologie zur Datierung von Gesteinen und Mineralen verwendet, weil das $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis vom Alter des Gesteins abhängt (Stanley & Faure 1979, Elderfield 1986, Faure & Powell 2012). Davon ausgehend hat sie seitdem auch Anwendung in zahlreichen weiteren Gebieten gefunden, angefangen bei der Archäometrie, über die Ökologie und Paläoökologie, die Physiologie und Medizin, bis hin zur Forensik und den Lebensmittelwissenschaften (Coelho et al. 2017, Ryan et al. 2018). In den meisten dieser Anwendungsbereiche wird sich die Tatsache zunutze gemacht, dass die untersuchten Isotopensignaturen von anorganischen und organischen Materialien sich geographisch unterscheiden lassen und dadurch Rückschlüsse auf Bewegungsmuster, Migration, Handel, Herkunft etc. gezogen werden können (Bentley 2004, Coelho et al. 2017).

In der historischen Anthropologie können, anhand von Strontiumisotopenanalysen an verschiedenen mineralisierten Hartgeweben (Knochen und Zähnen) aus archäologischen Funden, Migrationsereignisse und Mobilitätsmuster früherer Populationen und Individuen sichtbar gemacht werden (Ericson 1985, Hoogewerff et al. 2001, Hodell et al. 2004, Bentley 2006, Montgomery et al. 2007, Knudson et al. 2016). Die Methode hat sich in diesem Bereich inzwischen zum standardmäßig angewandten Verfahren entwickelt (Makarewicz & Sealy 2015). Dabei muss bestimmt werden, welche $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ von den lokal zu erwartenden Grenzwertbereichen abweichen, um nicht-lokale Individuen bzw. Werte zu erkennen (Grupe et al. 1997, Schweissing & Grupe 2003, Slater et al. 2014, Coelho et al. 2017).

Grundvoraussetzung hierfür ist die Definition der lokalen Grenzwerte (Price et al. 2002, Tütken 2010, Grupe et al. 2011). Es wurde eine Vielzahl verschiedener Methoden entwickelt, um das bioverfügbare Strontium bzw. die Variabilität bestimmter Probentypen an einem Standort zu schätzen. Diese variieren in ihrer Komplexität und der Anzahl einbezogener Parameter. Das Spektrum reicht vom rein statistischen Ausschluss von Ausreißern (in der Regel „ \pm zweifache Standardabweichung“) über den direkten Vergleich mit lokalen geologischen, pflanzlichen oder tierischen Referenzproben, bis hin zu komplexen Mischungsmodellen, die mehrere Faktoren, wie Wasser, Boden und Vegetation miteinbeziehen (Bataille & Bowen 2012, Lengfelder et al. 2019).

Lokale Referenzwerte können entweder direkt gemessen oder geschätzt werden, was beides Vor- und Nachteile mit sich bringt: Empirische Messdaten sind essentiell, um die Vorhersagen von Modellen über bioverfügbares Strontium evaluieren zu können. Typische Referenzmaterialien sind unter anderem Oberflächenwasser (Chesson et al. 2012), Böden (Lynn Ingram & Weber 1999, Barnett-Johnson et al. 2008), Vegetation (Evans et al. 2006, Keller et al. 2007, Viner et al. 2010) oder ossifizierte Gewebe von Tieren mit kleinem Streifgebiet (Ezzo et al. 1997, Hoppe et al. 1999, Blum et al. 2000).

Der Nachteil bei direkt gemessenen Referenzproben ist einerseits die Tatsache, dass sie insbesondere im archäologischen Kontext nicht immer für jeden Standort in ausreichender Stichprobenanzahl verfügbar sind und zum anderen, dass sie nicht immer direkt mit der eigentlichen Stichprobe verglichen werden können. Modellerte Daten haben den Vorteil, dass sie bei ausreichenden Hintergrundinformationen universell einsetzbar sind und ohne Feld- oder Laborstudien auskommen. Dadurch ist aber auch entsprechend ihre Auflösung begrenzt und immer abhängig von der empirischen Datengrundlage. Großflächige Vorhersagemodelle über bioverfügbares Strontium sind bisher nur für den nordamerikanischen Raum verfügbar.

Detailliertere Schätzungen des lokalen Bereiches setzen also ein gutes Vorwissen über die lokale und regionale isotopische Variabilität voraus. Die korrekte Festlegung solcher Grenzen gestaltet sich aber nach wie vor schwierig und ist noch immer Gegenstand aktueller Forschung, da es oft schwer abzuschätzen ist, welche Isotopien noch in den Rahmen der lokalen Norm fallen und welche nicht (Montgomery et al. 2007). Unter anderem liegt das auch daran, dass das Wissen über die räumliche (und zeitliche) Mittelung der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werte verschiedener Materialien und die Frage inwieweit sich diese von Material zu Material bzw. von Art zu Art unterscheidet, noch recht begrenzt ist (Crowley et al. 2017).

Bisher existieren nur wenige umfassende Studien über die verschiedenen strontiumrelevanten Umweltaspekte (Oberflächenwasser, tierische Gewebe, Vegetation, Boden etc.) und wie diese das $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des zugrundeliegenden Gesteins integrieren. Dadurch ist die Genauigkeit darauf basierender Modelle oftmals gering (Crowley et al. 2017). Allgemein lassen sich immer präzisere Aussagen aus Stabilisotopenanalysen zu Herkunft und Migration erwarten, wenn mehrere Isotopensysteme parallel und einander ergänzend untersucht werden (Bentley 2006, McManus et al. 2013, Laffoon et al. 2014, Valentine et al. 2015). Nur wenige Arbeiten aus der bioarchäologischen Forschung haben sich auch bereits mit Strontiumisotopen in organischen Materialien, wie Haaren und Textilien beschäftigt (Frei et al. 2009). Eine wachsende Anzahl an Studien benutzen die $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Methode dazu, Lebensereignisse einzelner Individuen zu rekonstruieren, indem verschiedene Zahntypen oder Zähne und Knochen miteinander verglichen werden (Bentley et al. 2003, Schweissing & Grupe 2003, Scheeres et al. 2013). Trotzdem haben sich bisher nur relativ wenige Publikationen näher mit der intra-individuellen Variabilität von Strontiumisotopen in Zahnproben einer lokalen Population beschäftigt (Gregoricka 2014, Slater et al. 2014, Knudson et al. 2016).

Auch in rezentem Kontext können die stabilen Isotope von Strontium zur Mobilitäts- und Herkunftsanalysen verwendet werden. In der Ökologie wird die Methode ebenfalls häufig zu verschiedenen Zwecken angewandt (Graustein & Armstrong 1983, Hobson 1999). Hier finden sich zum Beispiel mittlerweile zahlreiche Studien zu allgemeinen Stoffkreisläufen in Ökosystemen (Gosz et al. 1983, Rundel 1988, Åberg 1995, Négrel & Deschamps 1996, Blum et al. 2000) oder zur Mobilität bzw. Migration verschiedener terrestrischer oder aquatischer Tiere, wie Zugvögeln, wandernden Fischen oder Elefanten (Koch et al. 1992, Chamberlain et al. 1996, Cerling et al. 1997, Rubenstein & Hobson 2004, Font et al. 2007). So wurden beispielsweise diverse Aspekte tropischer und gemäßigter Waldökosysteme anhand von $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ näher erforscht (Miller et al. 1993, Poszwa et al. 2002, Poszwa et al. 2004, Pett-Ridge et al. 2009).

In der Forensik und Rechtsmedizin können $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Daten von verschiedenen Materialien als Indizien zur Identifizierung unbekannter Toter verwendet werden (Beard & Johnson 2000, Rummel et al. 2007, Lehn & Graw 2014). Im Gegensatz zu archäologischen Untersuchungen können hier häufig auch organische (Weich-)Gewebe, wie Haare, Nägel, Haut etc. beprobt und analysiert werden, wodurch ein Einblick in verschiedene Lebensabschnitte des Individuums ermöglicht wird (Lehn & Graw 2012, Lehn et al. 2015). Da in organischen nicht-mineralisierten Geweben der Strontiumanteil deutlich geringer ist als im biologischen Apatit, bedarf es hierbei spezieller Methoden zur adäquaten Extraktion ausreichender Mengen des Elements (Font et al. 2012). Dasselbe gilt natürlich auch entsprechend für Studien aus anderen Fachbereichen, in denen Strontiumisotopen an organischen Materialien gemessen werden (Font et al. 2007, Frei et al. 2009, Flockhart et al. 2015).

Dazu gehört auch das stetig wachsende Feld der Lebensmittelauthentifizierung. Seit einigen Jahren wird vermehrt daran gearbeitet, die Stabilisotopenanalyse auch in Bezug auf die Überprüfung der Herkunft bestimmter Nahrungsmittel und landwirtschaftlicher Produkte einsetzen zu können (Coelho et al. 2017). Obwohl das Interesse an diesem Feld groß ist, beschäftigen sich nur vergleichsweise wenige Arbeiten zur Multiisotopenanalyse an Lebensmitteln eher nebenbei mit den stabilen Isotopen

des Strontiums (Kelly et al. 2005, Gonzalez et al. 2009, Zhao et al. 2014, Baffi & Trincherini 2016, Danezis et al. 2016). Viele fokussieren sich sogar ausschließlich auf die Isotopensignaturen leichter Elemente, ohne die schweren Geoelemente miteinzubeziehen (Reid et al. 2006, Luykx & Van Ruth 2008, Primrose et al. 2010, Rock 2012).

Ein möglicher Grund hierfür ist womöglich die noch unzureichende Datengrundlage für eine feingliedrige Auflösung stabiler Strontiumisotope und ein Mangel an Wissen über die Effekte der verschiedenen natürlichen und anthropogenen Effekte, die in der modernen Landwirtschaft eine Rolle beim Zustandekommen des $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisses spielen. Wohl am intensivsten erforscht ist und wird das Verhalten stabiler Strontiumisotopenverhältnisse in Weinen, weil hier die Herkunft als wirtschaftlich besonders ausschlaggebend gilt (Barbaste et al. 2002, Di Paola-Naranjo et al. 2011, Durante et al. 2013, Marchionni et al. 2013, Durante et al. 2015). Es existieren aber auch erste Studien zu Mineralwasser (Montgomery et al. 2006, Voerkelius et al. 2010), Frucht- und Gemüsesäften (Rummel et al. 2010), pflanzlichen Ölen (Janin et al. 2014, Medini et al. 2015), Reis (Kawasaki et al. 2002) und vielen weiteren Lebensmitteln.

Auch tierische Produkte werden bezüglich potenzieller Anwendungsmöglichkeiten der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Methode untersucht. So wurde bereits an diversen Milch- (Rossmann et al. 2000, Crittenden et al. 2007, Stevenson et al. 2015) und Fleischprodukten (Franke et al. 2005, Franke et al. 2007, Franke et al. 2008, Baroni et al. 2011) geforscht. Bisher ist es aber oftmals nicht möglich, anhand von Strontiumisotopenverhältnissen konkrete Aussagen über die Herkunft eines Produktes zu treffen. In der Regel können, wenn überhaupt (selbst in Kombination mit anderen Isotopensystemen) bestenfalls verschiedene Länder oder gar nur Kontinente unterschieden werden (Franke et al. 2007, Trincherini et al. 2014). Mit Sicherheit spielen bei den Schwierigkeiten, die sich in Bezug auf die Strontiumisotopenforschung an modernen landwirtschaftlichen Produkten ergeben, auch die Globalisierung und der damit verbundene weltweite Transfer von Düngemitteln, Futter und Waren eine große Rolle.

Es existieren einige kontrollierte Fütterungsstudien in Bezug auf die Untersuchung stabiler Isotopenverhältnisse, doch die meisten davon behandeln die Isotopen leichter Elemente und stellen Untersuchungen an kleinen Tieren und/oder leicht zugänglichen Körperbestandteilen, wie Blut, Haaren und Urin an (Ambrose 2002, Podlesak et al. 2008). Fütterungsstudien zu $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ sind bisher hingegen selten. Flockhart et al. (2015) führten eine solche Studie an Schmetterlingen und den zugehörigen Futterpflanzen unter Laborbedingungen durch, um die nicht (oder kaum) vorhandene Fraktionierung von $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ über Trophieebenen hinweg experimentell zu bestätigen. Eine der hier vorgestellten Studie sehr ähnliche Arbeit von Lewis et al. (2017) führte ein kontrolliertes Fütterungsexperiment an domestizierten Schweinen durch um potentielle isotopische Unterschiede in den $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnissen zwischen zwei verschiedenen Fütterungstypen (schwankender Anteil marinen Proteins) festzustellen. Es wurden hier allerdings keine Knochen oder Weichgewebe untersucht. Da die Herkunft des gefütterten Sojas außerdem unbekannt war und die beiden verglichenen Futtertypen sich zufällig isotopisch stark ähnelten, konnten hier nur unzureichende Aussagen getroffen werden. Allerdings konnte in diesem Experiment herausgefunden werden, dass in den untersuchten Schweinen die Isotopie des Körpers maßgeblich vom konsumierten Futter und nur marginal vom getrunkenen Wasser abhing. Studien wie diese geben auch einen Einblick darin, welche Variation der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werte an einem bestimmten Standort zu erwarten sind. Dies war unter anderem auch Ziel der hier vorgestellten Arbeit.

E. Sauerstoff und seine stabilen Isotope

Sauerstoff ist, was die Masse angeht, das häufigste Element der Erde und bildet die größten Anteile der Hydrosphäre, der Biosphäre und der Lithosphäre (Cook & Lauer 1968). Er ist mit einer atomaren Masse von 16 u ein leichtes Element und kommt in der Natur in drei stabilen Isotopen vor: ^{16}O (~ 99,75 %), ^{17}O (~ 0,04 %) und ^{18}O (~ 0,12 %) (Hoefs 2008, Grupe et al. 2015). Bei Studien zu geografischer Herkunft oder Klima wird in der Regel das Verhältnis von ^{18}O zu ^{16}O untersucht. Wie bei leichten Elementen üblich, wird dieses Verhältnis in der δ -Notation in Promille, bezogen auf ein internationales Referenzmaterial angegeben (Craig 1961, Coplen 1995). Das $\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnis berechnet sich dabei nach folgender Formel (Fry 2007, Emsley 2011):

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{Probe}} - ^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{Standard}}}{^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{Standard}}} \times 1000 \text{ (in ‰)}$$

Bei Sauerstoff werden die Probenverhältnisse auf den internationalen Standard VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) bezogen (Gonfiantini 1978). In den folgenden Kapiteln werden zunächst die Anwendungsmöglichkeiten der $\delta^{18}\text{O}$ -Analyse vorgestellt, sowie der Stand der Forschung zum Verhalten von Sauerstoffisotopenverhältnissen in der Biosphäre und dem Körper homoiothermer Tiere.

1. Anwendung und Erforschung von stabilen Sauerstoffisotopen in verschiedenen Fachbereichen

Die Untersuchung der stabilen Isotope von Sauerstoff (^{18}O und ^{16}O) hat mittlerweile Einzug in verschiedene Fachgebiete gefunden. Auch dieses Isotopensystem ist, wie $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ geeignet, Informationen über die Aspekte geografischer Verteilungsmuster zu generieren. Anders als $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ist $\delta^{18}\text{O}$ jedoch nicht als Funktion der Geologie zu verstehen, sondern hängt vielmehr von hydrologischen Faktoren ab, die sowohl räumlich, als auch über die Zeit hinweg variieren können. Damit sind die beiden Isotopensysteme unabhängig voneinander und können in Studien zur Herkunftsanalyse oder Migration komplementär zueinander verwendet werden, um unterschiedliche Komponenten geografischer Gebiete miteinzubeziehen (Kelly et al. 2005, Crittenden et al. 2007, Tütken 2010, Chau et al. 2017).

Die $\delta^{18}\text{O}$ -Analyse ist mittlerweile ein häufig angewandtes Werkzeug in Paläoklimastudien (Longinelli 1973, d'Angela & Longinelli 1990, Ayliffe et al. 1992, Huertas et al. 1995) und Fragestellungen der historischen und prähistorischen Anthropologie bezüglich Mobilität und Migration (Bowen et al. 2009, Gregoricka 2014, Grupe et al. 2015, Pederzani & Britton 2018). In der Ökologie werden Sauerstoff- und Wasserstoff-Isotopenverhältnisse ebenfalls häufig untersucht (Chamberlain et al. 1996, Hobson 1999, Bowen et al. 2005, Wolf et al. 2011) und auch in rechtsmedizinischen Gutachten kann die Methode Anwendung finden und wertvolle Indizien liefern (Fraser et al. 2006, O'Brien & Wooller 2007, Meier-Augenstein & Fraser 2008, Lehn & Graw 2012, Lehn & Graw 2014).

Inzwischen gibt es auch vermehrt Ansätze, die Anwendung von $\delta^{18}\text{O}$ -Messungen als Methode zur Herkunftsüberprüfung von Lebensmitteln zu etablieren. Dabei gibt es bereits erste Ansätze für die Authentifikation von Getränken, wie Säften und Wein (Dunbar 1982, Dunbar & Wilson 1983, Holbach et al. 1994, Huerou et al. 1999), pflanzlichen Lebensmitteln (Chesson et al. 2008, Chesson et al. 2010), sowie Milch- und Fleischprodukten (Kornexl et al. 1997, Pilonel et al. 2003, Boner & Förstel 2004,

Franke et al. 2005, Franke et al. 2007, Franke et al. 2008, Heaton et al. 2008, Nakashita et al. 2008, Ehtesham et al. 2015, Chen & Auerswald 2018).

Unabhängig vom Anwendungsgebiet ist es in allen diesen Fachbereichen wichtig, das Isotopensystem von $\delta^{18}\text{O}$ bestmöglich zu verstehen, um möglichst aussagekräftige Informationen aus den Daten zu generieren. Dies gilt für die stabilen Isotope von Sauerstoff insbesondere, da es sich hierbei um ein leichtes Element handelt und die verschiedenen schweren Isotope somit zahlreichen Fraktionierungsvorgängen unterworfen sind. Die Allgegenwärtigkeit von Sauerstoff in der Biosphäre macht das Verständnis seiner stabilen Isotopenverhältnisse besonders bei der Untersuchung höherer Lebewesen zu einem hochkomplexen Thema. Zahlreiche Studien beschäftigen sich deshalb mit der Frage, wie sich die $\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnisse auf ihrem Weg in den Organismus und seinen verschiedenen Körperbestandteilen verhalten.

Eine mögliche Herangehensweise sind dabei strikt kontrollierte physiologische (medizinische) Experimente, wie beispielsweise bei Gretebeck et al. (1997), oder Schoeller et al. (1986), Schoeller (1988) und Schoeller (1990). Dabei können einzelne Faktoren gezielt manipuliert werden, wie zum Beispiel durch den Einsatz von isotopisch doppelt markiertem Wasser. Meist werden so ganz bestimmte Aspekte einzelner Stoffwechselwege oder Stoffflüsse nachvollzogen. Die Stichprobengrößen in solchen Experimenten sind meist sehr überschaubar, dafür herrschen hochkontrollierte Bedingungen vor. Eine weitere Möglichkeit zur Untersuchung von Sauerstoffisotopenverhältnissen sind kontrollierte Fütterungsstudien, in denen eine bestimmte Anzahl an Versuchstieren unter kontrollierten Bedingungen gehalten und analysiert wird, oft verbunden mit einer gezielten Veränderung der Parameter (wie Trinkwasser oder Futter) und einer dazugehörigen Kontrollgruppe (z.B. Biondi et al. (2013), Kirsanow & Tuross (2011), O'Grady et al. (2012), Podlesak et al. (2008), Tuross et al. (2008)).

Solche Studien können wertvolle Informationen liefern, doch die Kontrolle der vielen verschiedenen Parameter ist oft mit viel Aufwand verbunden und besonders bei größeren Tieren umständlich. Eine dritte Option sind großangelegte geografische Studien, bei denen viele Proben eines bestimmten Typs von verschiedenen Standorten genommen und miteinander, bzw. mit den lokalen Bedingungen verglichen werden (z.B. Boner & Förstel (2004), Rossmann et al. (1999), Chesson et al. (2010), Ehleringer et al. (2008)). Dadurch können großflächige geografische Muster erkannt und die räumliche Variation von $\delta^{18}\text{O}$ eingeschätzt werden. Nachteil ist hier meist, dass nur wenige Faktoren berücksichtigt und die Parameter nicht kontrolliert werden können.

Schließlich gibt es noch solche Arbeiten, die sich mit rein theoretischen Denkansätzen dem Thema nähern und mathematische Modelle für die Zusammensetzung von $\delta^{18}\text{O}$ erarbeiten, die dann später in experimentellen Studien validiert werden können (Luz et al. 1984, Bryant & Froelich 1995, Kohn 1996). Alle diese Ansätze finden ihre Berechtigung und beleuchten verschiedene Aspekte der Sauerstoffisotopensystematik. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse liefern miteinander kombiniert die Grundlage für verlässliche Aussagen in entsprechenden Fragestellungen. Das Potential der Methodik ist dabei bei weitem noch nicht ausgeschöpft, viele Vorgänge noch nicht vollständig erforscht und der Aussagekraft vieler Studien sind derzeit noch Grenzen gesetzt (Franke et al. 2008, Tuross et al. 2008, Chen & Auerswald 2018, Pederzani & Britton 2018). Diese Arbeit will auch in Sachen $\delta^{18}\text{O}$ -Analysen einen Beitrag zum besseren Verständnis von Isotopenverhältnissen im tierischen Organismus leisten. In den folgenden Kapiteln wird zunächst ein Überblick darüber geboten, was über Sauerstoff, seine Stoffflüsse und seine stabilen Isotopenverhältnisse in Umwelt und Organismus bereits bekannt ist. Dieses Wissen dient als Grundlage für die Auswertung und Interpretation der hier generierten Daten.

2. Sauerstoff und seine stabilen Isotope ($\delta^{18}\text{O}$) im tierischen Organismus

Um die Verteilung und das Zustandekommen stabiler Sauerstoffisotopenverhältnisse ($\delta^{18}\text{O}$) innerhalb tierischer Gewebe nachvollziehen zu können, muss man alle relevanten Wege betrachten, über die Sauerstoff in den Körper gelangt (Inputs) und diesen wieder verlässt (Outputs) (Green et al. 2018). Des Weiteren müssen die Mechanismen und Prozesse berücksichtigt werden, welche innerhalb des Organismus stattfinden und zur Bildung der entsprechenden Gewebe und Kompartimente beitragen. Für homoiotherme Tiere (Säugetiere und Vögel) sind die generellen Sauerstoffströme, welche die stabilen Sauerstoff-Isotopenverhältnisse des Körpers in signifikanten Quantitäten beeinflussen, relativ gut erforscht (Luz et al. 1984, Luz & Kolodny 1985, Schoeller et al. 1986, Schoeller 1988, Bryant & Froelich 1995, Kohn 1996, Gretebeck et al. 1997, Ehleringer et al. 2008, Chen & Auerwald 2018, Green et al. 2018). Unzureichend ist der Kenntnisstand jedoch teilweise in Bezug auf den exakten Einfluss von saisonaler, artspezifischer und individueller Variation und bestimmte Fraktionierungsvorgänge, die beim Ein- oder Austreten und innerhalb des Körpers stattfinden (Koch et al. 1989, Bryant & Froelich 1995, Kohn et al. 1996, Podlesak et al. 2008, Tuross et al. 2008, Kirsanow & Tuross 2011, Wolf et al. 2011, Green et al. 2018).

Abbildung 8 gibt eine allgemeine Übersicht über die Sauerstoffflüsse rund um den tierischen Organismus. Sie fasst die Grundlagen verschiedenster publizierter Modelle zu Sauerstoff-Inputs (grün) und –Outputs (rot), sowie der (isotopischen) Zusammensetzung von für diese Arbeit relevanten Körperbestandteilen zusammen. In den folgenden Kapiteln soll auf diese verschiedenen Aspekte im Einzelnen näher eingegangen werden.

Im Allgemeinen gelangt Sauerstoff in Form von Wasser (H_2O), molekularem Sauerstoff (O_2) und gebunden an organische Makromoleküle der Nahrung (Futter-O) in den Körper eines an Land lebenden Säugetieres. Abgegeben wird Sauerstoff vor allem in Form von flüssigem Wasser ($\text{H}_2\text{O}_{\text{flüssig}}$), Wasserdampf ($\text{H}_2\text{O}_{\text{dampf}}$) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) (Bryant & Froelich 1995, Kohn 1996, Green et al. 2018, Pederzani & Britton 2018). Bei archäometrischen, forensischen, ökologischen und lebensmitteltechnischen Studien zu $\delta^{18}\text{O}$ werden häufig das Knochen- oder Zahnschmelzmineral (hier: Phosphat = PO_4^{3-}), keratinöse Hartgewebe wie Haare (Haar) oder Federn, oder das Körperwasser (KW) untersucht (Longinelli 1984, Luz et al. 1984, Ayliffe & Chivas 1990, d'Angela & Longinelli 1990, Ayliffe et al. 1992, Huertas et al. 1995, Boner & Förstel 2004, Fraser et al. 2006, O'Brien & Wooller 2007, Ehleringer et al. 2008, Bowen et al. 2009, Wolf et al. 2011, O'Grady et al. 2012, Biondi et al. 2013, Green et al. 2018, Pederzani & Britton 2018).

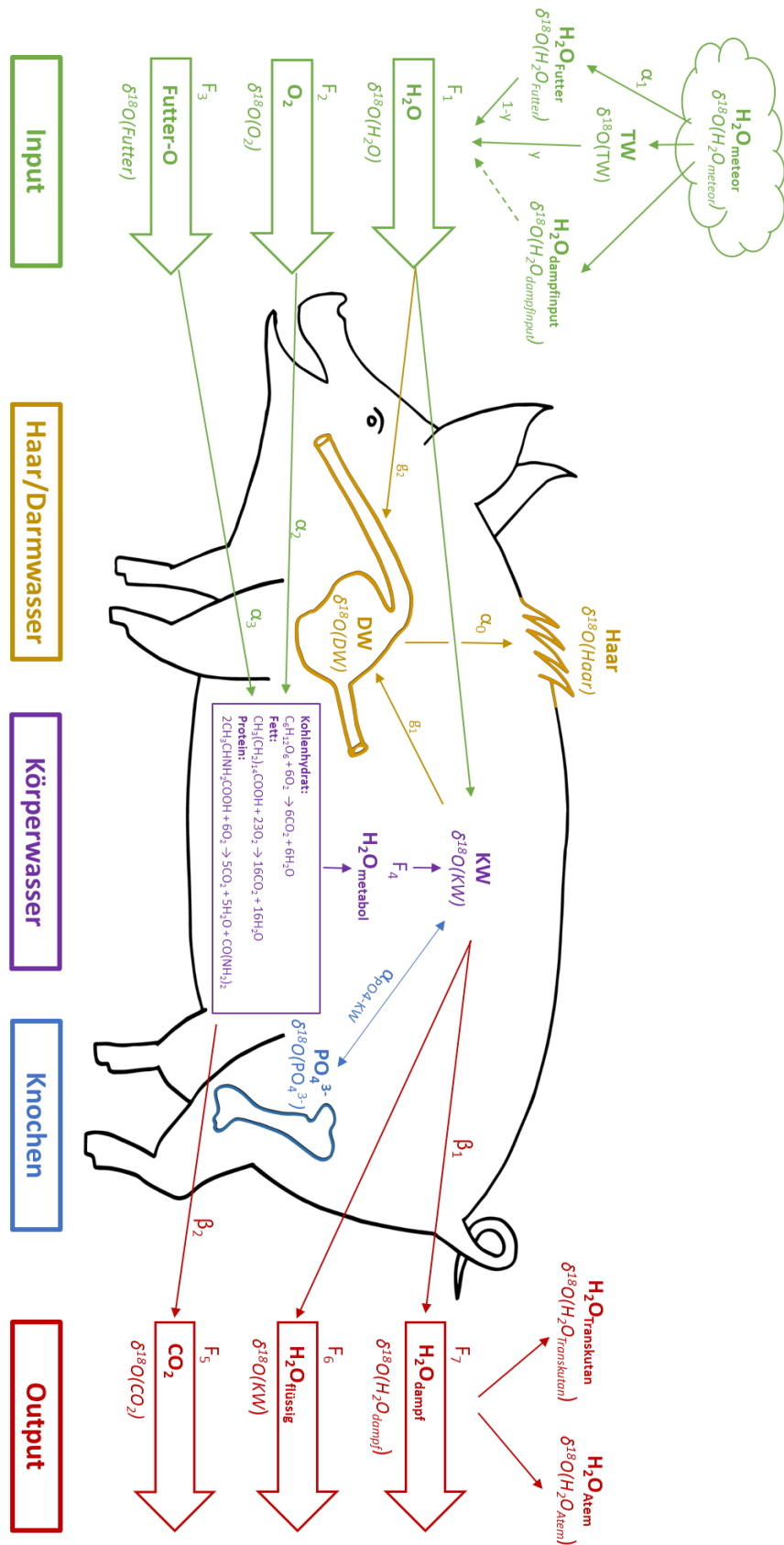


Abbildung 8 Sauerstoffflüsse im tierischen Organismus. Inputs (grün), Outputs (rot) und körperinnere Sauerstoffbewegungen: KW = Körperwasser (lila), DW = Darmwasser und Haare (gelb) und PO_4^{3-} = Knochen- bzw. Zahnschmelz-Phosphat (blau). F = Flussrate; $\delta^{18}\text{O}(\text{X})$ = Sauerstoffisotopie von Fluss oder Pool X; α und β = Fraktionierungsfaktoren; TW = Trinkwasser.

Bei **Abbildung 8** und den damit zusammenhängenden Erläuterungen der Sauerstoffbewegungen gilt es zu beachten, dass sich ein Sauerstofffluss jeweils aus zwei bis drei Aspekten zusammensetzt, die für die entsprechenden Modellierungen von Bedeutung sind: Zum einen spielt die Flussrate eine Rolle, welche beschreibt, wieviel Sauerstoff auf dem entsprechenden Weg transportiert wird. Flussraten können im Verhältnis zueinander, oder als molare Masse angegeben werden [mol/Tag]. Des Weiteren ist das Isotopenverhältnis, also der $\delta^{18}\text{O}$ -Wert der jeweiligen Sauerstoffquelle essenziell. Die Kombination aus Flussrate und Isotopie gibt also Aufschluss darüber, wieviel Sauerstoff einer bestimmten isotopischen Signatur von A nach B gelangt. Bei manchen Transportvorgängen kommt es darüber hinaus zu Fraktionierungsvorgängen, die den $\delta^{18}\text{O}$ -Wert des entsprechenden Sauerstoffflusses im Zuge des Transfers verändern können. Alle in **Abbildung 8** aufgeführten Variablen werden in **Tabelle 1** erläutert und sind nach Flussrate, $\delta^{18}\text{O}$ -Wert und Fraktionierungsfaktor aufgeschlüsselt. Nähere Beschreibungen und konkrete Zahlen finden sich in den jeweiligen Unterkapiteln.

Einleitung

Tabelle 1 Variablen zur Modellierung von Sauerstoff-Isotopen-Flüssen im tierischen Organismus. Flussraten geben an, welche Menge an Sauerstoff über den entsprechenden Stoffwechselweg bewegt wird. Der $\delta^{18}\text{O}$ -Wert beschreibt das Verhältnis der stabilen Sauerstoffisotope des jeweiligen Flusses. Fraktionierungsfaktoren beschreiben die physikalische oder physiologische Fraktionierung im Zuge einer Sauerstoffbewegung.

Bezeichnung	Erläuterung	Flussrate	$\delta^{18}\text{O}$ -Wert	Fraktionierungsfaktor
H₂O_{meteor}	Meteorisches Wasser (Niederschlag)	-	$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$	α_1 : zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$
Inputs				
H₂O	Wasser-Input (gesamt)	F ₁	$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O})$	-
TW	Trinkwasser	y	$\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$	-
H₂O_{Futter}	Wasser in Nahrung	1-y	$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$	-
H₂O_{dampfinput}	Wasserdampf-Input	Vernachlässigbar	$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{dampfinput}})$	Vernachlässigbar geringe Mengen
O₂	Molekularer Sauerstoff	F ₂	$\delta^{18}\text{O}(\text{O}_2)$	α_2 : bei der Aufnahme ins Blut
Futter-O	In Nahrungsmolekülen gebundener Sauerstoff	F ₃	$\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$	α_3 : bei Konvertierung in CO ₂ und H ₂ O _{metabol}
Körperwasser				
KW	Körperwasser	F ₁ + F ₄	$\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$	-
H₂O_{metabol}	Metabolisches Wasser	F ₄	-	-
Haar/Darmwasser				
DW	Darmwasser	g ₁ + g ₂	$\delta^{18}\text{O}(\text{DW})$	-
Haar	Haare/Borsten	-	$\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$	α_0 : zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{DW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$
Knochenphosphat				
PO₄³⁻	Phosphat im Knochenapatit	-	$\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$	$\alpha_{\text{PO}_4\text{-KW}}$: zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$
Outputs				
CO₂	Kohlenstoffdioxid	F ₅	$\delta^{18}\text{O}(\text{CO}_2)$	β_2 : zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{CO}_2)$
H₂O_{flüssig}	Flüssiges Wasser	F ₆	$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{flüssig}})$	-
H₂O_{dampf}	Wasserdampf	F ₇	$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{dampf}})$	β_1 : zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{dampf}})$
H₂O_{Atem}	Über Atem abgegebener Wasserdampf	-	$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Atem}})$	
H₂O_{Transkutan}	Über Haut abgegebener Wasserdampf	-	$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Transkutan}})$	

a) *Sauerstoffinputs in den Körper*

Die Quellen, über die Sauerstoff in den Körper gelangt, lassen sich in drei Kategorien unterteilen: Wasser (H_2O), molekularer Sauerstoff (O_2) und organische Makromoleküle (Sauerstoff in Kohlenhydraten, Fetten und Proteinen) (Sponheimer & Lee-Thorp 1999, White et al. 2004, Wolf et al. 2011). Theoretisch lassen sich alle diese Inputs als Funktionen von Umweltwasser ($\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}}$) und atmosphärischem Disauerstoff (O_2) beschreiben (Kohn 1996, Wright & Schwarcz 1998).

(1) *Vorgeformtes Wasser*

Der H_2O -Input besteht aus sämtlichem Wasser, das (zum größten Teil in flüssiger Form) bereits als Wasser in den Körper gelangt (vorgeformtes Wasser) und nicht erst im Zuge metabolischer Reaktionen gebildet wird (metabolisches Wasser). Das vorgeformte Wasser setzt sich aus Trinkwasser (TW), Wasseranteilen der Nahrung ($\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}}$) und Wasserdampf ($\text{H}_2\text{O}_{\text{dampfinput}}$) zusammen.

Von allen Sauerstoffquellen hat der H_2O -Input den größten Einfluss auf die isotopische Körperzusammensetzung der meisten Organismen (Longinelli 1984, Bryant & Froelich 1995, Kohn 1996, Sponheimer & Lee-Thorp 1999, Ehleringer et al. 2008, Podlesak et al. 2008, Bowen et al. 2009). Viele Studien haben deshalb lineare Zusammenhänge zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$, $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$, $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ oder anderen Körpergeweben in Form von artspezifischen Regressionen hergestellt (Longinelli & Padalino 1980, Longinelli 1984, Luz & Kolodny 1985, d'Angela & Longinelli 1990, Ayliffe et al. 1992, Chillón et al. 1994, Cormie et al. 1994, Leyden et al. 2006, O'Brien & Wooller 2007, Daux et al. 2008, Wolf et al. 2011). Im Idealfall sind alle H_2O -Quellen auf lokales Niederschlagswasser ($\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}}$) zurückzuführen, was allerdings nicht immer der Fall sein muss (Bryant & Froelich 1995). Obwohl viele Modelle die Sauerstoffisotopenverhältnisse von Körperbestandteilen direkt über $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ modellieren, ist also Vorsicht geboten, da nicht-lokale oder nicht primär aus dem Niederschlag stammende Wasserquellen unter bestimmten Bedingungen vorherrschen und sich signifikant von $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ unterscheiden können.

Umweltwasser und Niederschlagswasser

Im Folgenden soll zunächst auf die Mechanismen und Prozesse eingegangen werden, welche die isotopische Signatur von (lokalem) Umweltwasser bestimmen. Der Begriff Umweltwasser beschreibt sämtliches, in nicht-organischen Quellen enthaltenes Wasser, also Niederschlag, Grundwasser, Oberflächenwasser usw. Bereits seit einigen Jahrzehnten ist bekannt, dass Wassermoleküle mit verschiedenen $\delta^{18}\text{O}$ -Werten (also H_2^{16}O und H_2^{18}O) im Zuge bestimmter Transformationsprozesse fraktioniert werden und dass das Ausmaß dieser Fraktionierung temperaturabhängig ist (Gleichgewichtsfractionierung) (Urey 1948, Dansgaard 1964). Die Fraktionierung von Wasser tritt insbesondere bei Kondensations- und Evaporationsprozessen auf, wobei Wassermoleküle mit schwerem ^{18}O bevorzugt in der flüssigen Phase verbleiben, bzw. in diese übergehen und solche mit leichtem ^{16}O eher in gasförmigem Zustand bleiben oder in diesen übergehen (Dansgaard 1964, Rundel 1988). Zahlreiche Folgestudien haben gezeigt, dass die Isotopenzusammensetzung des lokalen Niederschlages ($\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$) weltweit bestimmten Effekten unterworfen ist und vorhersagbaren Mustern folgt (Epstein & Mayeda 1953, Craig 1961, Moser & Stichler 1971, Gat 1980, Yurtsever & Gat 1981, Förstel & Hütten 1984, Bowen et al. 2005, Bowen et al. 2007).

Die spezifische $\delta^{18}\text{O}$ -Signatur von Wasser des Niederschlags eines bestimmten Ortes kann als das kumulative Endergebnis der gesamten Vorgeschichte interpretiert werden, die das entsprechende im Niederschlag enthaltene Wasser durchlaufen hat (Yurtsever & Gat 1981, Gonfiantini 1985, Rozanski et al. 1993, Araguás-Araguás et al. 2000, Läderach & Sodemann 2016). Diese Geschichte beginnt in der Regel mit der Evaporation von Wolkenmassen im Bereich tropischer Ozeane (Pederzani & Britton 2018). Der so entstehende Wasserdampf ist gegenüber dem Meereswasser an ^{18}O angereichert und der $\delta^{18}\text{O}$ -Wert sinkt durch anschließende Kondensation von an ^{18}O angereichertem Niederschlag kontinuierlich weiter (Holbach et al. 1994, Pederzani & Britton 2018). Dieses progressive Abregnen von schwerem Isotop lässt sich anhand mehrerer geografischer und klimatischer Effekte beschreiben:

Der **Temperatureffekt** beschreibt generell, dass sich unter niedrigen Kondensationstemperaturen weniger schweres Isotop im Niederschlag befindet und damit in kälteren Gebieten oder zu kälteren Zeiten niedrigere $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Niederschlag zu erwarten sind als unter wärmeren Bedingungen (Dansgaard 1953, Dansgaard 1954, Dansgaard 1964). Eine grobe allgemeine Formel für die Berechnung von $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$, basierend auf der Temperatur lautet: $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}}) \approx 0.69 \cdot T(^{\circ}\text{C}) - 13.6$ (Dansgaard 1964). Dieser Effekt macht sich sowohl auf jahreszeitlicher Ebene bemerkbar (mit höheren $\delta^{18}\text{O}$ -Werten im Sommer), als auch über lange klimatische Zeiträume hinweg (Epstein 1956, Craig 1961, Dansgaard 1964, Kohn & Welker 2005, Stumpp et al. 2014, Müller et al. 2017).

Der Temperatureffekt ist in tropischen Gebieten weniger stark ausgeprägt, weil ihm dort der sogenannte **Niederschlagsmengeneffekt** entgegenwirkt. Dieser wird verursacht durch eine reduzierte Evaporation und isotopische Equilibrierung in großen Regentropfen (Dansgaard 1964, Bony et al. 2008) und bei erhöhter Luftfeuchtigkeit (Rozanski et al. 1993, Araguás-Araguás et al. 2000, Salamalakis et al. 2016), sowie durch das vermehrte Recycling re-evaporierter Feuchtigkeit (Risi et al. 2008, Moore et al. 2014, Cai & Tian 2016) bei hohen Niederschlagsmengen in einer Region. Am stärksten ausgeprägt ist der Niederschlagsmengeneffekt in Küsten- und Inselgebieten (Rozanski et al. 1993), sowie in tropischen und vom Monsun beeinflussten Bereichen (Aizen et al. 1996, Araguás-Araguás et al. 1998, Posmentier et al. 2004, Vuille et al. 2005).

Temperatur- und Niederschlagsmengeneffekt variieren weltweit geographisch und mit den Jahreszeiten (**saisonale Effekte**) nach vorhersagbaren Mustern (Jacob & Sonntag 1991, Feng et al. 2009, Field 2010, Clark & Fritz 2013, Klaus et al. 2015, Salamalakis et al. 2016). Sie sind damit die Grundlage für viele Klimarekonstruktionsmodelle und Herkunftsanalysen (Van der Straaten & Mook 1983, Longinelli 1984, Luz et al. 1984, Rozanski et al. 1992, Johnsen et al. 1995, Jouzel et al. 2000).

Der **Breitengradeffekt** besagt, dass die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des Niederschlags mit steigender Entfernung vom Äquator abnehmen, zum einen weil die Temperaturen zu den Polen hin sinken und zum anderen weil die bloße Entfernung vom Ursprung der Wolkenbildung (tropische Ozeane) zu einer höheren Wahrscheinlichkeit des progressiven Abregnens schwereren Wassers führt (Dansgaard 1964, Yurtsever 1975, Araguás-Araguás et al. 2000). Laut Holbach et al. (1994) bestimmt die geographische Breite global gesehen am stärksten die Verteilung von stabilen Sauerstoffisotopenmustern.

Analog zur steigenden Distanz zum Äquator verhält es sich mit steigenden Entfernungen von der Küste (**Kontinentaleffekt**). Auch hier sinkt der Anteil an schwerem Isotop im Niederschlag zunehmend, und zwar je weiter man ins Landesinnere vordringt (Dansgaard 1964, Araguás-Araguás et al. 2000, Bowen et al. 2005). Genauso lässt sich dieses Prinzip bei steigenden Höhenlagen wiederfinden (**Höheneffekt**): zum einen entfernen sich auch hier die Wassermassen vom Ursprung ihrer Entstehung und zum anderen sinken in erhöhten Lagen die Temperaturen (Holdsworth et al. 1991, Gonfiantini et al. 2001, Poage & Chamberlain 2001, Dutton et al. 2005). Laut Siegenthaler & Oeschger (1980) sinkt $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ dabei um ca. 0.2 bis 0.4 ‰ pro 100 Metern Höhenanstieg.

$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ hängt also von geo- und topographischen Faktoren wie Breitengrad, Höhenlage und Entfernung von der Küste ab, sowie von klimatischen Faktoren, wie Temperatur, Niederschlagsmenge, Luftfeuchtigkeit und Jahreszeit. Diese Effekte sind grundsätzlich global gültig und die Muster zur Entstehung von $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ gut bekannt (Moser & Stichler 1971, Förstel & Hützen 1982). Dank der vorhersagbaren Einflüsse von Kontinentalität, Höhe, Breitengrad etc. auf $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ können so großflächige Vorhersagen getroffen und die Isotopenverhältnisse für einen bestimmten Ort interpoliert, oder in Isotopen-Karten ganzer Regionen zusammengefasst werden (Förstel 1985, Bowen & Wilkinson 2002, Bowen & Revenaugh 2003, Bowen et al. 2007, Bowen 2010, Kern et al. 2014, West et al. 2014).

Frühe Ansätze für $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ -Karten und -Modelle wurden später mit geografischen Informationssystemen (GIS) und online verfügbaren Datensätzen zur räumlichen Verteilung von Wasserisotopen verbessert (Rozanski et al. 1993, Dutton et al. 2005, Welker 2012). Für die Berechnung von Schätzwerten nutzen gängige Modelle neben den Isotopendaten umliegender Messstationen auch räumliche und klimatische Faktoren zur Anpassung der Interpolationsparameter (Bowen & Revenaugh 2003, Liu et al. 2008, Van der Veer et al. 2009, Bowen 2010, Terzer et al. 2013).

Mit dem „Online Isotopes in Precipitation Calculator“ (OIPC) kann, basierend auf der Datengrundlage regelmäßig erhobener $\delta^{18}\text{O}$ -Werte umliegender Messstationen, ein $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ -Wert für jeden beliebigen Ort interpoliert werden (www.waterisotopes.org, Bowen (2015)). Die Präzision der Schätzung hängt von der Dichte an Messstationen im jeweiligen Gebiet und dem Umfang der dort gemessenen Proben ab. Ermitteln lassen sich dabei sowohl das Jahresmittel der Sauerstoffisotopie, als auch die zu erwartenden saisonalen Schwankungen in Form monatlicher Werte (Bowen et al. 2005). Ähnliche Schätzungen lassen sich beispielsweise auch über das „Global Network of Isotopes in Precipitation“ (GNIP) der „International Atomic Energy Agency“ (IAEA) und der „World Meteorological Organization“ (WMO) anstellen (Terzer et al. 2013). Auch hier basieren die kontinuierlich verbesserten clusterbasierten Modellierungen auf Messungen, deren Datensätze im Laufe der Zeit immer weiter vergrößert wurden (Dansgaard 1964, Rozanski et al. 1993, Aggarwal et al. 2010).

In vielen Fällen entspricht das Umweltwasser an einem Ort, welches Pflanzen und Tieren zur Verfügung stellt, isotopisch ungefähr dem lokalen Niederschlag. $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ oder entsprechende interpolierte Schätzungen sind dann ein guter Vergleichswert für isotopische Modellrechnungen zu tierischen Geweben (Rozanski 1985, Kohn 1996, Tian et al. 2001, Daux et al. 2008). Allerdings können bestimmte Umweltwasserquellen sich in ihrer Sauerstoffisotopie auch mehr oder weniger stark vom lokalen Niederschlagswasser unterscheiden (Pederzani & Britton 2018).

Neben dem Niederschlag können an einem Ort auch Wasserkörper, wie das Grundwasser und Quellen, stehende Oberflächengewässer (Teiche und Seen) oder Fließgewässer (Flüsse und Bäche) den H_2O -Input in die Biosphäre bestimmen. Generell hat sich gezeigt, dass auch diese meist gut mit $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ übereinstimmen (Gat 1995, Kendall & Coplen 2001, Darling et al. 2003, Van Geldern et al. 2014, Gibson et al. 2016), wobei Flüsse, Seen und das Grundwasser in der Regel einen gewichteten Mittelwert des lokalen Niederschlagswassers über das Jahr hinweg und für ein großflächigeres Gebiet repräsentieren (Gonfiantini 1986, Gibson & Edwards 2002, Darling et al. 2006, Van Geldern et al. 2014, Rank et al. 2018). Örtlich und saisonal auftretende Variationen in $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ werden also zu einem relativ konstanten Wert gemittelt. Damit sind vor allem große stehende Gewässer wie Seen, aber auch das Grundwasser über die Zeit hinweg isotopisch stabiler (Pederzani & Britton 2018). Saisonale Schwankungen in den meisten Oberflächen- und unterirdischen Gewässern sind demnach gering (meist $< 2 \text{ ‰}$), weil die Gesamtheit des angesammelten Wassers isotopische Veränderungen puffert und mittelt (Frederickson & Criss 1999, Kortelainen & Karhu 2004, Jones et al. 2005, Reddy et al. 2006, Paternoster et al. 2008, Pham et al. 2009, Wassenaar et al. 2009, Gat 2010, Jones & Imbers 2010). Grundwasser ist häufig ebenfalls über lange Zeiträume gemittelt, was die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von

Grundwasser sehr stabil macht (Darling et al. 2003, Kortelainen & Karhu 2004, Darling et al. 2006, West et al. 2014). Boner & Förstel (2004) geben an, dass das Grundwasser in Süddeutschland relativ stabile $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von ca. $-11.2 \pm 0.5 \text{ ‰}$ aufweist, wobei das Gebiet hierzu gemessener Proben sich nur auf Oberbayern beschränkt.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass stehende Gewässer und das Grundwasser in der Regel den isotopischen Mustern des lokalen Niederschlags folgen, dabei aber über die Zeit hinweg weniger schwanken (Holbach et al. 1994). Flüsse, Seen und auch das Grundwasser können allerdings auch vom lokalen $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ abweichen, wenn sie aus nicht-lokalen Quellen gespeist werden, wie zum Beispiel mit Wasser aus höheren Lagen (Krabbenhof et al. 1990, Ramesh & Sarin 1992, Musgrove & Banner 1993, Datta et al. 1996, Ingraham et al. 1998, Weyhenmeyer et al. 2002, Seiler & Gat 2007). In bestimmten Gebieten können zusätzlich saisonale Effekte auftreten, wenn beispielsweise ein Fließgewässer im Frühling und Sommer mit Schmelzwasser aus Gletschereis gespeist wird, welches dann isotopisch eine andere Jahreszeit und andere Höhenlagen repräsentieren kann (Holbach et al. 1994, Bowen et al. 2007, Rank et al. 2012, Meier et al. 2013, Halder et al. 2015, Congjian et al. 2016, Jeelani et al. 2017). Bei stehenden Gewässern, in denen das Wasser über lange Zeiträume hinweg gespeichert wird, kann es zudem zu einer evaporativen Anreicherung an H_2^{18}O kommen (Craig & Gordon 1965, Fontes et al. 1986, Martinelli et al. 1996, Tsujimura et al. 2007, Jasechko et al. 2014).

Trinkwasser

Ein an einem bestimmten Ort lebender Organismus kann seinen H_2O -Input also aus verschiedenen potentiellen Quellen beziehen, die nicht immer exakt die Isotopie des lokalen Niederschlagswassers widerspiegeln müssen. Das Trinkwasser eines Tieres kann, je nach Lebensweise bzw. Haltung, aus Niederschlagswasser, Quell- oder Brunnenwasser (also dem Grundwasser), sowie stehenden oder Fließgewässern stammen, von denen alle, wie zuvor beschrieben saisonalen Schwankungen unterliegen können (Wright & Schwarcz 1998, Sponheimer & Lee-Thorp 1999, Pederzani & Britton 2018). Modelle für die körperinternen Sauerstoffisotopenverhältnisse gewinnen dann an Qualität, wenn die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des tatsächlich aufgenommenen Trinkwassers bekannt sind und gemessen werden können anstatt indirekt über $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ geschätzt werden zu müssen (Daux et al. 2008, Bowen et al. 2009). Trotzdem ist für zahlreiche Fälle eine enge und vor allem nachvollziehbare Beziehung zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ belegt (Longinelli 1984, Luz et al. 1984, Daux et al. 2008). Zweifel an der Anwendbarkeit der linearen Beziehung zwischen Trinkwasser und körperinternem Sauerstoff werden von Pollard et al. (2011) vorgebracht, die das Potential der Fehlerfortpflanzung bei der Umrechnung der Isotopenverhältnisse als kritischen Punkt für die Aussagekraft solcher Modelle betrachten.

Das Trinkwasser stellt bei vielen Landsäugetierarten den größten H_2O -Input dar (Longinelli & Padalino 1980, Bryant & Froelich 1995, Kohn 1996, Ehleringer et al. 2008, Bowen et al. 2009). Wieviel Wasser in Form von Trinkwasser aufgenommen wird, hängt allerdings von zahlreichen inneren und äußeren Faktoren ab. Zunächst gibt es dabei artspezifische Unterschiede, was das Trinkverhalten angeht (Kohn 1996, Daux et al. 2008). Sogenannte obligate Trinker sind in ihrer isotopischen Zusammensetzung deutlich stärker vom Trinkwasser bestimmt, als Arten, die einen Großteil ihres Wassers aus der Nahrung beziehen (Bryant & Froelich 1995, Kohn 1996, Hoppe 2006, Ehleringer et al. 2010, Pederzani & Britton 2018). Auch spezielle thermoregulatorische Anpassungen und Adaptionen an Trockenheit haben einen Einfluss auf die Trinkwassermenge einer Art (Taylor 1970, Ayliffe et al. 1992). Darüber hinaus spielen individuelle Aspekte, wie das Alter, die Körpergröße, der Gesundheitsstatus und das Aktivitätslevel eine Rolle dabei, wieviel Wasser von einem Tier getrunken wird (Bryant et al. 1996, Kirsanow & Tuross 2011, Green et al. 2018). Größere Tiere trinken in der Regel proportional zu ihrer Körpermasse mehr als kleinere (Altman & Dittmer 1968, Bryant & Froelich 1995, Kohn 1996). Bei einem hohen Level an Aktivität ist ebenfalls mit einem erhöhten Trinkwasserbedarf zu rechnen (Bryant &

Froelich 1995, Ellis et al. 1995). Zu den äußeren Faktoren zählen unter anderem die Außentemperatur und die Luftfeuchtigkeit. Bei warmen Temperaturen und niedriger Luftfeuchte ist der Bedarf an Trinkwasser erhöht, weil über Hitzeregulationsmechanismen und Evaporation mehr Wasser an die Umgebung abgegeben wird (Kohn 1996, Boner & Förstel 2004). Infolgedessen kann es auch bezüglich der Trinkwassermenge zu saisonal bedingten Schwankungen kommen (Bryant & Froelich 1995).

Auch das Nahrungsangebot ist ein wichtiger Einflussfaktor dabei, wieviel Wasser in Form von Trinkwasser von einem Tier aufgenommen wird. Hoch hydriertes Futter verringert das Bedürfnis an zusätzlichem Trinkwasser, wohingegen trockene Nahrung (z.B. Trockenfutter) mit geringem Wasseranteil durch zusätzliches Trinken ausgeglichen werden muss (Luz et al. 1984, Boner & Förstel 2004, Daux et al. 2008). So trinken Grasfresser in der Regel beispielsweise signifikant mehr als blattfressende Arten, welche dafür mehr Wasser aus ihrer Nahrung beziehen (Goldstein & Sarmiento 1987, Sponheimer & Lee-Thorp 1999). Domestizierte Nutztiere sind in ihrer Lebensweise und damit in ihrem Trinkverhalten sehr stark vom Menschen beeinflusst und kontrolliert. Die Haltungsweise bestimmt dabei zum Beispiel die klimatischen Bedingungen, das Nahrungsspektrum und die Möglichkeit physischer Aktivität. Selbst genetische Faktoren können dabei vom Menschen durch Züchtung manipuliert und somit physiologische Prozesse verändert werden (Bryant & Froelich 1995, Green et al. 2018). Aufgrund der verschiedenen individuellen und umweltbedingten Einflussfaktoren, kann der (Trink-)Wasserverbrauch selbst innerhalb einer Art sehr variabel sein (Green et al. 2018).

Für den Gesamtwasser-Input eines Individuums sind also die Sauerstoffisotopen-Zusammensetzung des tatsächlich konsumierten Trinkwassers ($\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$) und die Menge des so aufgenommenen Wassers (y) von Bedeutung. Der Anteil des Trinkwassers am Gesamt- H_2O -Input ist neben $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ ausschlaggebend um die Isotopie und Flussrate des insgesamt aufgenommenen vorgeformten Wassers (F_1) bestimmen zu können, welches sich neben dem Trinkwasser auch aus in der Nahrung enthaltenem Wasser und eingeatmetem Wasserdampf zusammensetzt.

Nahrungswasser

Für die Zusammensetzung des Gesamtwasser-Inputs ist die Flüssigkeit in der Nahrung ($\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}}$) der zweite entscheidende Faktor (Daux et al. 2008). Säugetiere nehmen über die Nahrung meist signifikante Mengen Wasser auf, in extremen Fällen sogar mehr als mit dem Trinkwasser (Sponheimer & Lee-Thorp 1999). Pflanzen, als Grundlage der Nahrungskette, nehmen Umgebungswasser über ihre Wurzeln auf. Auch hier kommen verschiedene Quellen infrage, die aber (wie auch das Trinkwasser von Tieren) meist auf den lokalen Niederschlag zurückgehen (Epstein et al. 1977, Allison et al. 1985, Ehleringer & Dawson 1992, Kirsanow & Tuross 2011).

Das in der Nahrung (bzw. in Pflanzen) enthaltene Wasser entspricht im Gegensatz zum konsumierten Trinkwasser in seiner isotopischen Komposition jedoch so gut wie nie dem lokalen Umweltwasser (Dunbar 1982, Ellis et al. 1995, Houserou et al. 1999, Dawson et al. 2002, Green et al. 2018). In Pflanzen findet eine Fraktionierung des aufgenommenen Wassers vor allem in den photosynthetisch aktiven Pflanzenteilen statt (Dongmann et al. 1974). Wasser wird, meist über die Stomata der Blätter, im Zuge der Evapotranspiration abgegeben. Dabei bleibt isotopisch schwereres Wasser bevorzugt in der Pflanze zurück, wohingegen isotopisch leichtes Wasser bevorzugt verdunstet (Förstel 1978, Zundel et al. 1978, Barbour et al. 2004, Cernusak et al. 2016). Die Dampfdruckunterschiede beim Übergang von der flüssigen in die Gasphase zwischen Blattwasser und Außenwelt führen zu einer Akkumulation von H_2^{18}O in transpirierenden Pflanzenblättern (Dongmann et al. 1974, Merlivat 1978, Luz et al. 2009). Das hat zur Folge, dass Wasser in Pflanzen und insbesondere Wasser in Pflanzenblättern isotopisch deutlich gegenüber dem über die Wurzeln aufgenommenen Umweltwasser an ^{18}O angereichert ist (Gonfiantini et al. 1965, Dongmann et al. 1972). Der dabei auftretende Fraktionierungsfaktor wird von Luz et al. (1984) und in **Abbildung 8** als α_1 bezeichnet. Der Wert von α_1 ist jedoch nicht einheitlich, sondern hängt

von einer Vielzahl an Faktoren ab. Das Ausmaß der isotopischen Anreicherung hängt zum einen von der jeweiligen Pflanzenart, der entsprechenden Physiologie, Biochemie und den typischen Anpassungen und zum anderen von den klimatischen Außenbedingungen ab (Leaney et al. 1985, Sternberg 1989, Yakir 1992, Wang & Yakir 1995). So ist zum Beispiel Gras in der Regel stärker angereichert als andere Blattpflanzen (Helliker & Ehleringer 2000, Gan et al. 2002, Gan et al. 2003, Ogée et al. 2007).

Die Akkumulation von H_2^{18}O im Blattwasser ist, wie auch die Isotopie des Niederschlages, abhängig von der Umgebungstemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit (Epstein et al. 1977, Burk & Stuiver 1981, Holbach et al. 1994, Houerou et al. 1999, Barbour et al. 2017). Auch hierbei kommen saisonale Effekte zum Tragen: die stärkste isotopische Fraktionierung findet bei warmen Temperaturen und geringer Luftfeuchtigkeit statt, also in der warmen Wachstumsphase, in der die Pflanze auch am meisten Biomasse aufbaut (Förstel 1978, Kornexl et al. 1997, Boner & Förstel 2004). Je nach (klimatischen) Außenbedingungen und Pflanzenart kann $\delta^{18}\text{O}$ (Blattwasser) evaporationsbedingt um +10 bis +25 ‰ höher sein, als das aufgenommene $\delta^{18}\text{O}$ (Umweltwasser) (Dongmann et al. 1974, Farris & Strain 1978, Förstel 1978). Dongmann et al. (1974) gibt an, dass Blattwasser um mindestens 2.5 bis über 21 ‰ erhöht sein kann. Zwar ist die auftretende Fraktionierung in den Pflanzenblättern am höchsten, aber auch andere Pflanzenteile können erhöhte $\delta^{18}\text{O}$ -Werte aufweisen. Beispielsweise auch Früchte und Gemüse sind gegenüber dem konsumierten Grundwasser an ^{18}O angereichert (Bricout 1973, Dunbar & Wilson 1983). Schnellwachsende Pflanzen(-teile) (wie zum Beispiel viele Gemüse) sind dabei weniger stark angereichert, als langsam wachsende (wie viele Obstsorten). Allgemein gilt, dass der $\delta^{18}\text{O}$ -Wert von den Wurzeln, über den Stängel oder Stamm (in welchen die Isotopenverhältnisse noch weitestgehend mit dem Bodenwasser übereinstimmen) bis hin zu den Früchten und Blättern immer weiter ansteigt (Dunbar & Wilson 1983, Sponheimer & Lee-Thorp 1999). In extremen Fällen wurden in Pflanzenblättern sogar $\delta^{18}\text{O}$ -Werte gemessen, die gegenüber dem aufgenommenen Umweltwasser um bis zu 40 ‰ erhöht waren (Cernusak et al. 2016). Hier zeigt sich auch, warum der Gesamtwasser-Input in Trinkwasser und Nahrungswasser unterteilt werden muss: Da Nahrungswasser meist deutlich erhöhte $\delta^{18}\text{O}$ -Werte aufweist, muss es bei den Sauerstoff-Inputs in den tierischen Organismus anteilig berücksichtigt werden.

Neben der Fraktionierung an den Blättern, kann auch die Wurzeltiefe von Pflanzen Einfluss auf $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$ haben. Während tief wurzelnde Pflanzen ihr Wasser aus unteren Bodenschichten beziehen, welches in der Regel isotopisch konstant ist (Brunel et al. 1991, Busch et al. 1992, Adams & Grierson 2001, Barbour 2007), kann es bei flachen Wurzeln und Bodenwasser aus oberen Schichten zu Evaporationsprozessen kommen, welche die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des aufgenommenen Wassers bereits vor der Aufnahme in die Pflanze verändern (Dodd et al. 1998, Snyder & Williams 2000, Tang & Feng 2001, Cook & O'Grady 2006).

Auch Fleisch und andere Tierprodukte sind gegenüber dem lokalen Umweltwasser meist an ^{18}O angereichert (Schmidt et al. 2001, Thiem et al. 2004). Zum einen liegt das daran, dass das verzehrte Tier selbst wiederum Nahrungswasser und Sauerstoff aus anderen Quellen (Futter- O und O_2) neben dem Umweltwasser verzehrt hat und zum anderen finden im Körper selbst weitere Fraktionierungen und Modifikationen der Isotopenverhältnisse statt. Wie bereits erwähnt spielen beim Verhältnis von Trinkwasser zu Nahrungswasser mehrere Faktoren eine Rolle, wie artspezifische Anpassungen und die Ernährungsweise (Daux et al. 2008). In bestimmten Fällen (zum Beispiel bei Verzehr hochgradig hydrierter Pflanzen) kann das Nahrungswasser bis zu 50% des Gesamtwasser-Inputs ausmachen, wohingegen es bei Tieren, die zum Beispiel mit Trockenfutter gefüttert werden, kaum eine Rolle spielt (Luz et al. 1984, Daux et al. 2008). Lokale Herbivore können sich durch solche unterschiedlichen Muster im Fressverhalten um bis zu 8-9 ‰ unterscheiden (z.B. Blattfresser verglichen mit grasenden Herbivoren) (Bocherens et al. 1996, Kohn et al. 1996, Cerling et al. 1997). Allerdings spielen bei solch

drastischen Unterschieden zwischen verschiedenen Tiergruppen neben der Variation im Nahrungswasser und möglichen Unterschieden im jeweiligen Anteil von TW und $\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}}$ auch die organischen Nahrungsbestandteile eine Rolle.

Vorgänge bei der Aufnahme von Wasser in den Körper

Flüssiges Wasser stellt sowohl für den Gesamtwasser- als auch für den Gesamtsauerstoffinput den größten Anteil dar (Bryant & Froelich 1995, Sponheimer & Lee-Thorp 1999, Pederzani & Britton 2018). Theoretisch wird Wasser auch in sehr geringen Mengen als Wasserdampf über die Haut oder die Lunge vom Körper aufgenommen. Dabei kommt es prinzipiell zu einer temperaturabhängigen Fraktionierung der Sauerstoffisotope (Bottinga & Craig 1968, Kohn 1996). Der Anteil dieses gasförmig absorbierten Wassers am Gesamtwasserinput ist jedoch so gering, dass es, und damit auch die bei der Aufnahme auftretende Fraktionierung, in Modellen zur Berechnung der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von tierischen Körperbestandteilen in der Regel vernachlässigt werden kann (Nagy 1980, Nagy & Costa 1980, Luz et al. 1984, Bryant & Froelich 1995).

Entsprechend kann der Gesamtwasserinput (F_1) auf die flüssigen Formen vorgeformten Wassers vereinfacht werden: Trinkwasser (TW) und Nahrungswasser ($\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}}$) (Bryant & Froelich 1995, Daux et al. 2008). Wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben, kommt es sowohl bei der isotopischen Zusammensetzung von TW und $\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}}$, als auch beim jeweiligen Anteil am Gesamtwasserinput zu umwelt- und artbedingter, sowie individueller Variation. $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$ können sich dabei oft signifikant voneinander unterscheiden (Daux et al. 2008, Wolf et al. 2011). Da der Input an dampfförmigem Wasser unwesentlich ist, ergibt die Summe aus dem Anteil an Trinkwasser und dem an Nahrungswasser eins. Die Fraktion von TW kann also als „y“ und die von $\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}}$ als „(1-y)“ bezeichnet werden. Der Wert von (1-y) kann wiederum über den Wasseranteil der Nahrung, die Menge aufgenommener Nahrung und die Menge aufgenommenen Trinkwassers bestimmt werden (Daux et al. 2008). Mit den Werten für das Verhältnis zwischen Trink- und Nahrungswasser (y bzw. 1-y), $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$ kann dann das Sauerstoffisotopenverhältnis des Gesamtwasserinputs $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O})$ ermittelt werden, welches den $\delta^{18}\text{O}$ -Wert des insgesamt aufgenommenen (flüssigen) Wassers bezeichnet (Luz et al. 1984, Bryant & Froelich 1995). Es wird dabei allgemein angenommen, dass flüssiges Wasser ohne isotopische Fraktionierung des Sauerstoffes in den Körper gelangt (Luz et al. 1984, Ayliffe & Chivas 1990, Bryant & Froelich 1995, Podlesak et al. 2008).

(2) Nicht aus vorgeformtem Wasser stammender Sauerstoffinput

Neben dem Sauerstoffinput über vorgeformtes Wasser gibt es noch zwei weitere wichtige Wege, über die Sauerstoff in den Körper gelangt: Molekularer Sauerstoff aus der Atmosphäre und Sauerstoff, der in organischen Molekülen der Nahrung gebunden ist (Luz et al. 1984, Bryant & Froelich 1995, Kohn 1996, Green et al. 2018). Die isotopische Zusammensetzung eines Tieres wird daher nicht ausschließlich vom Trink- bzw. Futterwasser beeinflusst, sondern zu einem gewissen Teil von der Oxidation organischer Materie mitbestimmt (Bryant & Froelich 1995, Boner & Förstel 2004). Dabei reagiert Disauerstoff (O_2) mit den Nährstoffen (Kohlenhydrate, Fette, Proteine), wobei Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Wasser ($\text{H}_2\text{O}_{\text{metabol}}$) entstehen. Die O_2 - und Futter-O-Inputs hängen also physiologisch und metabolisch sowohl eng miteinander, als auch mit den entsprechenden Outputs an CO_2 und H_2O zusammen. Vom (Umwelt-)Wasserinput unterscheiden sie sich hingegen, weil $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter})$ nur indirekt davon abhängt und $\delta^{18}\text{O}(\text{O}_2)$ komplett unabhängig davon ist (O'Grady et al. 2012). Auf die körperinternen Reaktionen zwischen den einzelnen In- und Outputs wird im entsprechenden Kapitel ab Seite 48 näher eingegangen.

Sauerstoff in organischen Futtermolekülen

Abgesehen von Kohlenhydraten enthalten die meisten organischen Verbindungen nur wenig Sauerstoff, weswegen Kohlenhydrate in vielen Modellen zur Vereinfachung als die einzige organische Sauerstoffquelle angenommen werden (Schmidt et al. 2001, Podlesak et al. 2008). In organischen Makromolekülen von Futterpflanzen gebundener Sauerstoff ist letztendlich, wie auch $\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}}$, eine Funktion des von den Pflanzen aufgenommenen Wassers, wodurch lokale Nahrungsquellen auch mit dem lokalen Umweltwasser und damit indirekt mit geografischen Faktoren korrelieren (Kohn 1996, Houserou et al. 1999, Kirsanow & Tuross 2011). Allerdings sind die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von organischen Pflanzenbestandteilen ($\delta^{18}\text{O}(\text{Futter})$) gegenüber dem Umweltwasser meist noch deutlicher verändert als $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$ (Bowen et al. 2009). Das liegt zum einen daran, dass die entsprechenden Stoffe sich im Milieu des bereits angereicherten Blattwasser bilden und zum anderen kommt es bei der Synthese der jeweiligen Makromoleküle zu Fraktionierungsvorgängen (Kohn 1996).

So ist $\delta^{18}\text{O}(\text{Zellulose})$ im Vergleich zu $\delta^{18}\text{O}(\text{Blattwasser})$ zum Beispiel um ungefähr 27 ‰ erhöht (Epstein et al. 1977, DeNiro & Epstein 1979, Sternberg 1989). Zustande kommt dieser Zusammenhang durch Gleichgewichts-Isotopeneffekte zwischen den Carbonylgruppen der Zellulose und dem Wasser (Schmidt et al. 2001). Die genaue Fraktionierung ist jedoch zum Beispiel abhängig davon, ob es sich um eine C3- oder C4-Pflanze handelt (Burk & Stuiver 1981, Edwards et al. 1985, Yakir 1992), oder ob die untersuchte Zellulose aus den Blättern oder den Wurzeln einer Pflanze stammt (Yakir 1992, Tredget et al. 1993). Die Beziehung zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{Zellulose})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O})$ ist also relativ gut untersucht, viele andere Stoffe sind diesbezüglich jedoch völlig unerforscht (Roden et al. 2000, Chesson et al. 2010). Selbst bei der Zellulose gibt es noch Unsicherheiten, was den genauen Einfluss von Art und Stoffwechselstatus angeht, da mehrere verschiedene Reaktionen dabei eine Rolle spielen, die sich letztendlich in den meisten Fällen zu dem Wert von ca. $+27 \pm 4$ ‰ mitteln (Schmidt et al. 2001).

Wieviel Sauerstoff an organische Moleküle gebunden in den Körper gelangt (F_3) hängt vom jeweiligen Nahrungstyp, der Nahrungszusammensetzung, der Körpergröße und weiteren Faktoren wie Verdaulichkeit der Nahrungsbestandteile usw. ab (Bryant & Froelich 1995, Green et al. 2018). Von Podlesak et al. (2008) wurde zum Beispiel für Ratten ermittelt, dass organischer Sauerstoff in etwa 15% des Gesamtsauerstoffinputs ausmacht. Größere Tiere haben hingegen meist einen erhöhten relativen Trinkwasserverbrauch, sodass für sie der Anteil an F_3 deutlich geringer ausfallen kann (Bryant & Froelich 1995, Chen & Auerswald 2018).

Der exakte Wert von $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter})$ welcher tatsächlich in den Kreislauf aufgenommen wird, ist meist schwer bzw. gar nicht zu bestimmen, da organische Bestandteile der Nahrung nicht zu 100% verdaut werden und die genauen Fraktionierungsfaktoren für den aufgenommenen organisch gebundenen Sauerstoff unbekannt sind. Die Verdaulichkeit hängt von intrinsischen Eigenschaften der Nahrung und extrinsischen Eigenschaften des Verdauungstraktes ab (Bryant & Froelich 1995). Außerdem existiert in den meisten Nahrungsmitteln eine Vielzahl an verschiedenen Typen von Kohlenhydraten, Fetten und Proteinen und in der Regel ist die Komplexität dieser Zusammensetzung nur schwer exakt zu erfassen.

Molekularer Sauerstoff

Der in der Atmosphäre befindliche Disauerstoff wird von Tieren, im Zuge der Atmung, über die Lungen ins Blut aufgenommen. Der $\delta^{18}\text{O}$ -Wert des atmosphärischen O_2 ist dabei global und über die Zeit hinweg mehr oder weniger konstant und liegt bei etwa + 23.5 ‰ bis +23.8 ‰ (Dole et al. 1954, Kroopnick & Craig 1972, Horibe et al. 1973). Er ist damit der einzige Sauerstoffinput in den Körper, der nicht direkt oder indirekt vom Umweltwasser abhängig ist (Luz et al. 1984, Bryant & Froelich 1995, Kohn 1996, White et al. 2004). Der molekulare Sauerstoff tritt per Diffusion über die pulmonale Membran und die Bindung an das Hämoglobin in den Blutkreislauf ein (Weibel 1984). Da der eingeatmete Sauerstoff jedoch nicht vollständig absorbiert wird, findet bei der Aufnahme in den

Körper eine Fraktionierung um den Faktor α_2 statt (Luz et al. 1984). Es handelt sich dabei prinzipiell um einen kinetischen Aufnahmeprozess, der je nach artspezifischen aber auch individuellen Eigenschaften zu einer unterschiedlich starken Fraktionierung relativ zur Atmosphäre führen kann (Pflug & Schuster 1989, Zanconato et al. 1992, Kohn 1996). Mehrere Variablen können die Fraktionierung beeinflussen, zum Beispiel solche, welche die Extraktionseffizienz von O_2 aus der Luft betreffen, wie die Sauerstoffrate, die Diffusionsfaktoren an der pulmonalen Membran, die Rate der Hämoglobinbindung, die Konzentration an Erythrozyten und die physische Aktivität (Epstein & Zeiri 1988, Zanconato et al. 1992). $\delta^{18}O(O_2)$ des tatsächlich aufgenommenen Sauerstoffs lässt sich nach folgender Formel berechnen (Kohn 1996):

$$\delta^{18}O(O_2) \approx 23.5\text{‰} - Z \cdot (1 - OUF)$$

Dabei ist Z ein messbarer Faktor (in ‰), und OUF (Oxygen utilization fraction) der Anteil an Sauerstoff der tatsächlich aufgenommen wird. Z beträgt für Menschen in der Regel 9-12 ‰ und OUF üblicherweise 15-25 % für terrestrische Tiere, was zu einem $\delta^{18}O(O_2)$ von um die 15 ‰ führt (Stahl 1967, Altman & Dittmer 1971, Beaver et al. 1981, Schroter et al. 1987).

Beim Menschen entsteht durch inter- und intraindividuelle Unterschiede so zum Beispiel eine mögliche Bandbreite von -2 ‰ bis -9 ‰ durch Fraktionierung des in den Kreislauf aufgenommenen O_2 (Epstein & Zeiri 1988, Schuster & Pflug 1989). Für andere Arten ist die Fraktionierung von Sauerstoff in der Lunge weniger gut oder gar nicht erforscht (Bryant & Froelich 1995). Obwohl das Isotopenverhältnis von atmosphärischem Sauerstoff also relativ konstant ist, kann es je nach Art und Bedingungen zu einer gewissen Variation des $\delta^{18}O(O_2)$ -Inputs in den Körper kommen. Bryant & Froelich (1995) schätzen den Wert von $\delta^{18}O(O_2)$ auf ca. $+17.2 \pm 1$ ‰ ($\alpha_2 = 0.9937$) in Säugetieren mit einer Körpermasse zwischen einem und 4500 kg. Zanconato et al. (1992) hingegen gehen, basierend auf Untersuchungen am Menschen, von einer Fraktionierung von ca. 8 ‰ aus ($\alpha_2 = 0.992$), was zu einem Wert von ca. $+15.5$ ‰ für $\delta^{18}O(O_2)$ führt.

Unabhängig davon, welcher Wert von $\delta^{18}O(O_2)$ für eine bestimmte Art oder ein bestimmtes Individuum angenommen wird, kann festgehalten werden, dass dieser Wert unter gleichbleibenden Bedingungen (Futter, Aktivitätslevel etc.) für ein Individuum (oder eine Gruppe nah verwandter Individuen) relativ konstant bleibt (Bryant & Froelich 1995). Wie hoch die Flussrate (F_2) von O_2 in den Körper ist, hängt unter anderem von der Körpergröße, dem Aktivitätslevel und artspezifischen physiologischen Eigenschaften ab (Kohn 1996, Green et al. 2018). Allgemein gilt für terrestrische Tiere jedoch, dass F_2 ca. 25-30% des gesamten Sauerstoffinputs ausmacht (Kohn 1996, Podlesak et al. 2008).

b) Sauerstoffoutputs aus dem Körper

Für das Verständnis der sauerstoffisotopischen Körperzusammensetzung eines gleichwarmen Landtieres müssen nicht nur die Wege berücksichtigt werden, auf die Sauerstoff in den Körper gelangt, sondern auch diejenigen, über die er ihn wieder verlässt. Generell werden signifikante Mengen Sauerstoff in Form von Kohlenstoffdioxid (CO_2), flüssigem Wasser ($H_2O_{\text{flüssig}}$) und Wasserdampf (H_2O_{dampf}) ausgeschieden (Schoeller et al. 1986, Bryant & Froelich 1995, Bowen et al. 2009, Chen & Auerwald 2018). Die $\delta^{18}O$ -Werte aller dieser Outputs lassen sich als Funktionen des Körperwassers beschreiben ($\delta^{18}O(KW)$) (Bryant & Froelich 1995, Kohn 1996).

$\delta^{18}O(H_2O_{\text{dampf}})$ und $\delta^{18}O(CO_2)$ sind diesem gegenüber fraktioniert, was wiederum die Komposition des im Körper verbleibenden Sauerstoffes verändert (Lifson et al. 1949, Zimmermann & Cegla 1973, Schoeller et al. 1986, Wong et al. 1988). Sie werden also als $[\delta^{18}O(KW) + 1000 \cdot \beta - 1000]$ beschrieben,

wobei β den jeweiligen Fraktionierungsfaktor gegenüber dem Körperwasser darstellt (Schoeller et al. 1986, Chen & Auerswald 2018). Damit sind die Ausscheidungswege von Sauerstoff aus dem Körper eine maßgebliche, nicht zu vernachlässigende Einflussgröße für die Modellierung von Körperwasser und anderen Körperbestandteilen (Luz et al. 1984, O'Grady et al. 2012, Chen & Auerswald 2018).

Auch bei den Output-Flüssen spielen zahlreiche artabhängige, physiologische, metabolische und Umweltfaktoren eine signifikante Rolle, was auch hier zu einer großen Variabilität im $\delta^{18}\text{O}$ des Körpers verschiedener Arten, Individuen, Jahreszeiten und sogar Körperbestandteile führen kann (Ritz et al. 2005, Green et al. 2018). So hängen die Anteile der verschiedenen In- und Outputs zum Beispiel maßgeblich von der Körpergröße ab, weil der Wasserfluss bei höherer Körpermasse relativ zu metabolischer Rate und Körperoberfläche schneller steigt und damit die Bedeutung von Trinkwasser relativ zu O_2 , CO_2 , und $\text{H}_2\text{O}_{\text{dampf}}$ zunimmt (Bryant & Froelich 1995). Trink- und Atmungsrate sind physiologische Parameter, die auch für die Sauerstoff-Outputs eine Rolle spielen (Luz et al. 1984). Auch saisonale und haltungsbedingte Aspekte haben einen Einfluss auf die Flussraten und Fraktionierungsvorgänge der Sauerstoff-Outputs (Kohn 1996, Chen & Auerswald 2018).

(1) Wasser

Genauso wie bei den Inputs spielen auch die Flussraten an Wasser, die den Körper verlassen eine große Rolle. Das abgegebene Wasser stammt aus dem Körperwasser und wird damit vom Input an vorgeformtem Wasser bestimmt, aber auch von der Beimengung metabolisch gebildeten Wassers ($\text{H}_2\text{O}_{\text{metabol}}$) und dem Sauerstoffaustausch mit anderen Molekülen (Luz et al. 1984, Bryant & Froelich 1995). Bei einem Tier im Stoffgleichgewicht kann der Gesamtwasserfluss (TWF = Total Water Flux) als diejenige Menge Wasser bestimmt werden, die in ein Tier pro Tag hinein, bzw. hinausfließt (Nagy 1989). Der H_2O -Output ($F_6 + F_7$) ist in der Regel höher als der H_2O -Input (F_1), da zusätzliches metabolisches Wasser (F_4) im Zuge katabolischer Prozesse gebildet wird. Der TWF entspricht also der Summe aus F_1 ($\text{H}_2\text{O}_{\text{input}}$) und F_4 ($\text{H}_2\text{O}_{\text{metabol}}$) oder der Summe aus F_6 ($\text{H}_2\text{O}_{\text{flüssig}}$) und F_7 ($\text{H}_2\text{O}_{\text{dampf}}$) (Luz et al. 1984, Kohn 1996).

Wieviel Wasser tatsächlich von einem Tier (pro Tag) ausgeschieden wird und über welche Wege, hängt neben der Körpermasse auch von der Futterbeschaffenheit und –zusammensetzung, der Temperatur, dem Aktivitätslevel, dem Grad und der Methode der Körpertemperaturregulation und den Haltungsbedingungen ab (Schmidt-Nielsen 1964, Bryant & Froelich 1995, Chen & Auerswald 2018). Das Verhältnis von F_6 zu F_7 ist eine wichtige Kenngröße, weil es den Anteil des Wassers angibt, welches den Körper fraktioniert verlässt und damit, wie stark das verbleibende Körperwasser durch Fraktionierungsvorgänge verändert wird (Luz et al. 1984).

Flüssiges Wasser

Der $\text{H}_2\text{O}_{\text{flüssig}}$ -Output umfasst all jene Wege, bei denen Wasser den Körper in flüssiger Form verlässt und nicht direkt aus dem Körperwasser evaporiert. Dazu gehören zum Beispiel Urin, Speichel, Milch, Fäkalwasser und auch Schweiß (welcher erst evaporiert, nachdem er in flüssiger Form über die Schweißdrüsen abgegeben wurde) (Bryant & Froelich 1995, Chen & Auerswald 2018, Green et al. 2018). Sie alle haben gemein, dass das in flüssiger Form abgegebene Wasser nicht fraktioniert wird (Schoeller et al. 1986, Bryant & Froelich 1995, Kohn 1996). Es ist isotopisch also mit dem Körperwasser gleichzusetzen ($\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{flüssig}}) = \delta^{18}\text{O}(\text{KW})$) (Wong et al. 1988, Abeni et al. 2015).

Urin macht in der Regel den größten, oder zumindest einen der größten $\text{H}_2\text{O}_{\text{flüssig}}$ -Output-Flüsse aus, nämlich ungefähr 15-25% des Gesamt- H_2O -Turnovers. Je nach physiologischer Anpassung und

Umgebungsbedingungen kann dieser Anteil aber auch unter 10% liegen und auf über 30-50% steigen (Kohn 1996). Hinzu kommen die Anteile von Fäkalwasser, Schweiß und Milch, die je nach Art und Außenbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Aktivität, Stillphase etc.) einen mehr oder weniger großen Einfluss haben können.

Wasserdampf

Wasserdampf ($\text{H}_2\text{O}_{\text{dampf}}$) wird vor allem über die Haut ($\text{H}_2\text{O}_{\text{Transkutan}}$) und den Atem ($\text{H}_2\text{O}_{\text{Atem}}$) abgegeben, wobei sich $\text{H}_2\text{O}_{\text{Atem}}$ nochmals unterteilen lässt in nasal und oral ausgeatmeten Wasserdampf (Bryant & Froelich 1995, Kornexl et al. 1997). Im Gegensatz zum Verlust an flüssigem Wasser, kommt es bei der Abgabe von $\text{H}_2\text{O}_{\text{dampf}}$ zur kinetischen Fraktionierung der Sauerstoffisotope, relativ zum Körperwasser (Zimmermann & Cegla 1973, Schoeller et al. 1986). Bei homoiothermen Landtieren finden diese Fraktionierungsvorgänge im Gleichgewicht mit $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ statt und können unter gleichbleibenden Außenbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit etc.) als konstant betrachtet werden. Dies gilt sowohl für $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Transkutan}})$, als auch für $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Atem}})$ (Luz et al. 1984, Schoeller et al. 1986, Wong et al. 1988, Ayliffe & Chivas 1990).

Bottinga & Craig (1968) geben beispielsweise an, dass bei 37°C Körpertemperatur $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Atem}})$ gegenüber $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ im Mittel konstant um -8.3 ‰ angereichert ist ($\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Atem}}) = \delta^{18}\text{O}(\text{KW}) - 8.3 \text{ ‰}$). Bei Schoeller et al. (1986) liegt die Differenz noch etwas höher, im Schnitt bei etwa -9 ‰ ($\beta_1(\text{H}_2\text{O}_{\text{Atem}}) = 0.991 \pm 0.001$). Dabei gibt es Unterschiede in der Fraktionierung, abhängig davon, ob der Wasserdampf über den Mund oder die Nase ausgeatmet wird: Der von Bottinga & Craig (1968) angegebene Wert von ca. -8 ‰ Unterschied zwischen oral ausgeatmetem $\text{H}_2\text{O}_{\text{Atem}}$ und dem Körperwasser ist deutlich verschieden von der nasalen Wasserdampffrac­tionierung zwischen -15 ‰ und -18 ‰, die von Langman et al. (1979) ermittelt wurde. Die oben genannten Werte von Bottinga & Craig bzw. Schoeller et al. für die Fraktionierung von $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Atem}})$ könnten also deutlich niedriger werden, wenn der Anteil an nasal ausgeatmetem Wasserdampf anstiege. Grundsätzlich wird aber meist mit gewichteten Mittelwerten zwischen -8.3 ‰ und -9 ‰ gerechnet (Bryant & Froelich 1995, Gretebeck et al. 1997).

Beim transkutanen Wasserdampfverlust kann die Fraktionierung deutlich stärker ausfallen. Laut Schoeller et al. (1986) führt sie im Durchschnitt zu Differenzen von ca. -19 ‰ (basierend auf Dansgaard (1964)), kann aber auch Werte bis hin zu -24 ‰ annehmen ($\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Transkutan}}) = \delta^{18}\text{O}(\text{KW}) - 19 \text{ ‰}$ oder ($\beta_1(\text{H}_2\text{O}_{\text{Transkutan}}) = 0.981 \pm 0.001$). Kohn (1996) rechnet mit einem ähnlichen Wert von -18 ‰ für die fraktionierungsbedingte Differenz transkutanen Wasserdampfes, basierend auf empirischen Werten zwischen -8 ‰ und -21 ‰ von Schoeller et al. (1986), Haggarty et al. (1988) und Coward (1988).

Das Verhältnis von $F_7(\text{H}_2\text{O}_{\text{Atem}})$ zu $F_7(\text{H}_2\text{O}_{\text{Transkutan}})$ ist schlecht bekannt und variiert mit vielen unvorhersagbaren Variablen. In Modellen wird die Gesamtfractionierung von $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Dampf}})$ deswegen oft nur grob geschätzt. So nehmen Bryant & Froelich (1995) beispielsweise relativ willkürlich an, dass F_7 sich zu etwa gleichen Teilen aus $\text{H}_2\text{O}_{\text{Transkutan}}$ und $\text{H}_2\text{O}_{\text{Atem}}$ zusammensetzt und wählen deswegen für $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{dampf}})$ eine Differenz von insgesamt -16.2 ‰ gegenüber $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$. Luz et al. (1984) rechnen hingegen, basierend auf Daten von Friedman & O'Neil (1977) mit einer Gesamtfractionierung evaporativen Wasserverlustes die zu einer Differenz von -8 ‰ führt, also einem deutlich geringeren Wert, als der von Bryant & Froelich verwendete. Auch von Schoeller et al. (1986) bzw. Schoeller & Coward (1990) wird für β_1 ein Wert von 0.992, also eine Differenz von -8 ‰ angegeben.

Wieviel Wasser insgesamt in Form von Wasserdampf vom Körper abgegeben wird (F_7), ist ebenfalls von vielen Faktoren abhängig (Temperatur, Aktivitätslevel, Grad und Methode der Körpertemperaturregulation, Durchlässigkeit der Haut, Verhältnis von Schwitzen zu Hecheln...), lässt sich aber beispielsweise über physiologische Parameter schätzen oder messen (Wong et al. 1988, Kohn 1996, Sponheimer & Lee-Thorp 1999). So existieren zum Beispiel körpermassabhängige Gleichungen

für den evaporativen Wasserverlust (EWL) (Altman & Dittmer 1968). Ist F_7 (evaporativer H_2O -Verlust) so bestimmt, kann auch F_6 (Verlust an flüssigem Wasser) aus der Differenz zwischen Gesamt- H_2O -Turnover und F_7 berechnet werden (Bryant & Froelich 1995). Generell liegt der Anteil von F_7 gegenüber F_6 bei etwa 20-40% (Luz et al. (1984): 37%, Schoeller et al. (1986): $23 \pm 10\%$, Bryant & Froelich (1995): 33%, Kohn (1996): 34%). Evaporationsprozesse spielen also eine große Rolle bei der Modifikation der $\delta^{18}O$ -Werte eines Tieres (Huertas et al. 1995). Je höher dabei F_7 ist, desto stärker ist das Körperwasser an ^{18}O angereichert (Schoeller et al. 1986).

Evaporative Sauerstoffisotopenfraktionierung ist stark von den klimatischen Bedingungen, wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit abhängig (Kohn 1996). Das gilt, genauso wie bereits für Umweltwasser und Pflanzenwasser, auch für die Evaporation und Transpiration bei Tieren. Damit ist auch hier eine starke saisonale Komponente gegeben, natürlich auch in Bezug auf die entsprechenden Flussraten (Ellis et al. 1995, Kornexl et al. 1997, Green et al. 2018). Die saisonalen Effekte sind oft sehr schlecht zu erfassen und abzuschätzen, was einen weiteren Unsicherheitsfaktor bei der Quantifizierung des H_2O -Outputs und der Bestimmung der Auswirkungen auf die $\delta^{18}O$ -Zusammensetzung des Tiergewebes ausmacht.

(2) Kohlenstoffdioxid

Bei der Oxidation organischer Nährstoffe entsteht metabolisches Wasser (H_2O_{metabol}) und Kohlenstoffdioxid (CO_2), welches H_2O_{metabol} gegenüber angereichert ist und damit einen großen Einfluss auf $\delta^{18}O(KW)$ hat (Podlesak et al. 2008). CO_2 ist demnach neben H_2O die zweite ausschlaggebende Form, in der Sauerstoff den Körper in signifikanten Mengen verlässt und so die Körper-Isotopie mitbeeinflusst. Im Blut tauschen sich CO_2 und H_2O im Zuge der enzymatischen Katalyse durch die Karboanhydrase sehr schnell isotopisch aus, sodass beide miteinander im Gleichgewicht stehen (Lifson et al. 1949, Green et al. 2018). Auch $\delta^{18}O(CO_2)$ ist also mit dem $\delta^{18}O$ -Wert des Körperwassers equilibriert und somit im Gleichgewicht mit $\delta^{18}O(KW)$ fraktioniert (Lifson et al. 1949, Wong et al. 1988, Pflug & Schuster 1989). Bei konstanter Körpertemperatur, wie sie bei Säugetieren gegeben, ist auch die Fraktionierung gegenüber dem Körperwasser konstant.

Der Fraktionierungsfaktor β_2 liegt bei ca. 1.0388, was einer Anreicherung von $\delta^{18}O(CO_2)$ um +38.8 ‰ gegenüber $\delta^{18}O(KW)$ entspricht (Brenninkmeijer et al. 1983). Schoeller et al. (1986) und Schoeller & Coward (1990) geben leicht abweichend davon einen Unterschied von nur 38 ‰ zwischen $\delta^{18}O(KW)$ und $\delta^{18}O(CO_2)$ an und der von Podlesak et al. (2008) experimentell bestimmte Fraktionierungsfaktor für Ratten liegt bei 1.0383, also +38.3 ‰ Anreicherung. Theoretisch ließe sich so $\delta^{18}O(KW)$ aus $\delta^{18}O(CO_2)$ berechnen, was in manchen Studien auch getan wurde. Allerdings ist jede derartige Umrechnung mit hohen potentiellen Fehlern behaftet, insbesondere wenn die absolut exakte Fraktionierung nicht bekannt ist.

Grob berechnen lässt sich diese Fraktionierung auch anhand der Gleichung von Pflug et al. (1979):

$$\delta^{18}O(CO_2) \approx \delta^{18}O(KW) + 17604/T(^{\circ}K) - 17.93 ,$$

was für Säugetier-Körpertemperaturen ebenfalls eine fraktionierungsbedingte Differenz von ca. 38 ‰ ergibt.

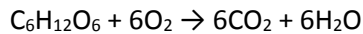
Wie viel Sauerstoff in Form von CO_2 abgegeben wird (F_5), hängt unter anderem von metabolischen und ernährungsspezifischen Gegebenheiten ab. Der Respirationsquotient (Rq) gibt das Verhältnis von produziertem CO_2 zu konsumiertem O_2 an und hängt maßgeblich mit der Zusammensetzung der

Einleitung

konsumierten Nahrung zusammen. Er wird aus der Stöchiometrie der Stoffwechselgleichungen für Kohlenhydrate, Fette und Proteine abgeleitet (Bryant & Froelich 1995):

$$Rq = (P \cdot 0.81) + (F \cdot 0.71) + (K \cdot 1.00)$$

P steht dabei für die Fraktion an Protein, F für die an Fett und K für die an Kohlenhydraten. Wie zu erkennen ist, liegt Rq von K bei 1, weil bei der Oxidation von Kohlenhydraten genauso viele Mol CO₂ entstehen, wie O₂ eingesetzt werden. In manchen Modellen wird vereinfachend angenommen, dass die gesamte Nahrung ausschließlich aus Kohlenhydraten besteht, wonach nach der stellvertretenden Gleichung



gilt, dass das Kohlenhydrat für 33.3 % und der atmosphärische O₂ für 66.6 % des Sauerstoffs in H₂O_{metabol} und CO₂ verantwortlich sind und 66.6 % des Sauerstoffes in CO₂ und 33.3 % in H₂O_{metabol} eingebaut wird (Podlesak et al. 2008, Green et al. 2018). Der Energieaufwand stellt eine physiologische Größe dar, die den Output an CO₂ beeinflussen kann, weil er beschreibt, wieviel Nahrung insgesamt verstoffwechselt wird (Gretebeck et al. 1997). Er lässt sich aus physiologischen Daten, oder der Körpergröße schätzen oder in experimentellen Studien messen (Bryant & Froelich 1995, Kohn 1996).

(3) Sonstige

Der Vollständigkeit halber muss noch erwähnt werden, dass Sauerstoff neben den bereits erwähnten Outputs, auch noch auf weitere Wege den Körper verlassen kann. Hierbei ist zu beachten, dass für Modelle zur Isotopenkomposition des Körpers nur solche Stoffe als relevant erachtet werden, die tatsächlich in den Körper gelangen, bevor sie wieder ausgeschieden werden (Kohn 1996). So setzen sich die organischen Bestandteile des Faeces zum größten Teil aus unverdauten Teilen der Nahrung zusammen, welche nie die Darmwand passieren, weswegen der darin gebundene Sauerstoff nicht in den Körperkreislauf gelangt und deshalb nicht berücksichtigt wird (Bryant & Froelich 1995). Die übrigen sauerstoffhaltigen Feststoffe, welche vom Körper abgegeben werden, wie Harnstoff und aus dem Körper stammende Abfallstoffe des Faeces, finden aufgrund ihrer vergleichsweise vernachlässigbaren Anteile in der Mehrzahl aller Modelle keine Berücksichtigung (Bryant & Froelich 1995, Kohn 1996). Harnstoff wird zum Beispiel bei der Oxidation von Proteinen gebildet. Diese machen in der Ernährung herbivorer Säugetiere in der Regel etwa 20% des Gesamtfutters aus (Kohlenhydrate: 75%, Fett: 5%). Unter Berücksichtigung der Stöchiometrie macht Harnstoff damit nur ca. 0.3% des Gesamt-Sauerstoff-Outputs aus (Bryant & Froelich 1995). Feste Abfallstoffe im Kot, nitrogene Abfallstoffe und Harnsäure sind noch schwerer abzuschätzen, aber sicher sind sie ebenfalls vernachlässigbar gering (Lifson & McClintock 1966, Nagy 1980, Kohn 1996). Schoeller et al. (1986) geben an, dass Feststoffe im Urin weniger als 0.028% des täglichen Sauerstoff-Outputs im Menschen ausmachen und Feststoffe im Faeces sogar nur 0.006%. H₂O und CO₂ können also als die einzigen relevanten Sauerstoff-Outputs angesehen werden.

c) Körperinterne Reaktionen und Körpergewebe

Alle im Körper ablaufenden Reaktionen und Vorgänge, die Sauerstoff und dessen Isotope beinhalten, geschehen auf der Grundlage der in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen In- und Outputs. Innerhalb des Körpers kann es jedoch zu weiteren Veränderungen kommen, welche die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte verschiedener Kompartimente und Gewebe mitbeeinflussen und verändern können, sodass verschiedene Körperbestandteile aufgrund ihrer unterschiedlichen Bildungseigenschaften verschiedene Sauerstoffisotopen aufweisen können (Luz et al. 1984, Ehleringer et al. 2008, Pederzani & Britton 2018). Grundsätzlich ist die sogenannte Turnover-Rate ein wichtiger Faktor, der zu Unterschieden zwischen verschiedenen Geweben führen kann (Weiler 2005). Sie beschreibt, wie schnell sich ein bestimmtes Gewebe, bzw. ein bestimmter Körperbestandteil mit seiner Umgebung austauscht und erneuert wird. Gewebe mit hohen Turnover-Raten spiegeln also die Sauerstoff-Inputs und –Outputs der unmittelbaren Vergangenheit wider, während solche mit niedrigen Turnover-Raten die Isotopenverhältnisse längerer Zeiträume mitteln (Bowen et al. 2005, Biondi et al. 2013). **Tabelle 56** im Anhang bietet einen Überblick über die metabolischen Eigenschaften, Turnoverraten und Integrationszeiten der untersuchten Körpergewebetypen.

(1) Körperwasser und metabolisches Wasser

Als Körperwasser (KW) wird sämtliches körperinternes Wasser bezeichnet, welches Teil des Kreislaufs und Stoffwechsels ist. Dazu gehört Wasser in den Körperflüssigkeiten (Blut, Urin, Schweiß, Milch etc.), sowie extra- und intrazelluläres Gewebwasser (in Organen, Muskeln etc.). Der Körper eines Säugetieres besteht zu etwa 65% aus Wasser (Longinelli 1984). Das Körperwasser wird in erster Linie aus vorgeformtem Wasser des Trinkwassers und der Nahrung, sowie aus metabolischem Wasser ($\text{H}_2\text{O}_{\text{metabol}}$) gespeist (Luz et al. 1984, Kohn 1996, Chesson et al. 2010). Metabolisches Wasser entsteht bei der Verstoffwechselung von Nahrung, indem O_2 und Futter-O zu CO_2 und H_2O reagieren (beim Abbau von Proteinen entsteht zusätzlich noch Harnstoff) (Luz & Kolodny 1985, Bryant & Froelich 1995). **Tabelle 2** zeigt jeweils stellvertretend für Kohlenhydrate, Fette und Proteine eine typische Stoffwechselreaktion in der das entsprechende Substrat katabolisch oxidiert wird (Bryant & Froelich 1995). Dieselben Reaktionen sind auch in **Abbildung 8** aufgeführt.

Tabelle 2 Typische katabolische Stoffwechselreaktionen für den oxidativen Abbau von Kohlenhydraten, Fetten und Proteinen.

Kohlenhydrat (Glukose)	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 \rightarrow 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$
Fett (Palmitinsäure)	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH} + 23\text{O}_2 \rightarrow 16\text{CO}_2 + 16\text{H}_2\text{O}$
Protein (Alanin)	$2\text{CH}_3\text{CHNH}_2\text{COOH} + 6\text{O}_2 \rightarrow 5\text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{O} + \text{CO}(\text{NH}_2)_2$

Die Menge an so produziertem Wasser wird mit der Flussrate F_4 bezeichnet und kann durchaus erheblich sein (Bryant & Froelich 1995, Kohn 1996). Da sowohl die Trockenmasse der Nahrung, als auch der Disauerstoff aus der Atmosphäre sich bezüglich $\delta^{18}\text{O}$ in der Regel deutlich unterscheiden, ist F_4 ein wichtiger zu berücksichtigender Faktor für die Zusammensetzung des Körperwassers. Innerhalb des Körperwasser-Pools findet außerdem ein schneller Austausch mit vielen anderen sauerstoffhaltigen Molekülen (wie z.B. CO_2) statt, wodurch auch diese $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ beeinflussen, solange sie nicht in anderen Kompartimenten des Körpers gebunden und somit vom KW-Pool isoliert sind (Green et al. 2018).

Körperwasser wird häufig für $\delta^{18}\text{O}$ -Studien an Menschen und Tieren untersucht, da es die Sauerstoff-Inputs und -Outputs (und damit die geografische bzw. klimatische Variation des Umweltwassers) am unmittelbarsten widerspiegelt, zudem bei rezenten Individuen leicht zugänglich ist und im Falle von ausgeschiedenen Körperflüssigkeiten wie Urin oder Milch sogar nichtinvasiv beprobt werden kann (Schoeller et al. 1986, Bryant & Froelich 1995, Bowen et al. 2005, Chen & Auerswald 2018). Da die Beziehung zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ sehr stark ist, wurden in mehreren Studien artspezifische lineare Korrelationen ermittelt, um diesen Zusammenhang empirisch zu beschreiben (Longinelli & Padalino 1980, Longinelli 1984, d'Angela & Longinelli 1990, Luz et al. 1990, Bryant & Froelich 1995). Solche linearen Gleichungen funktionieren am besten für große Tiere, die viel Trinkwasser aufnehmen, da bei diesen $\text{H}_2\text{O}_{\text{metabol}}$ relativ gesehen eine kleinere Rolle spielt (Bryant & Froelich 1995). Eine maßgebliche Rolle für das Zustandekommen von $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ spielt also die Körpermasse eines Tieres bzw. einer Art (Nagy & Peterson 1988, Bryant & Froelich 1995, Kohn 1996). Das bedeutet, dass es auch im Zuge der Ontogenese zu einer physiologisch bedingten Veränderung des Sauerstoffhaushaltes kommen kann (Kirsanow & Tuross 2011). Laut Podlesak et al. (2008) wird $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ von Kleinsäugetern bereits zu 56% von TW und zu 44% von $\text{H}_2\text{O}_{\text{metabol}}$ (also indirekt von Futter-O und O_2) bestimmt. Bei größeren Tieren und sogenannten obligaten Trinkern wird der Anteil des Trinkwassers noch deutlich höher. Doch selbst im hypothetischen Falle eines Tieres, bei dem nur der H_2O -Input und -Output eine signifikante Rolle spielen, ist $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ fast nie identisch mit $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$, weil es dann immer noch zur Fraktionierung beim evaporativen Verlust von H_2O kommen kann (obwohl auch dieser relativ zur steigenden Körpermasse abnimmt) (Bryant & Froelich 1995, Kornexl et al. 1997, Wright & Schwarcz 1998, Ehleringer et al. 2008).

Der KW-Pool bildet außerdem die $\delta^{18}\text{O}$ -Basis, aus der sich viele andere Gewebetypen speisen, welche für entsprechende Untersuchungen von Interesse sind (z.B. Keratin in Haaren und Federn oder Phosphat bzw. Karbonat in Knochen und Zähnen) (Luz et al. 1984, d'Angela & Longinelli 1990, Huertas et al. 1995, Gretebeck et al. 1997, Ehleringer et al. 2008, Bowen et al. 2009, Kirsanow & Tuross 2011, Chen & Auerswald 2018). Wegen dieser Interaktionen zwischen dem Körperwasser und den entsprechenden Gewebestufen werden die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der meisten Körpergewebe stark von $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ beeinflusst (Levinson et al. 1987, Podlesak et al. 2008, Kirsanow & Tuross 2011, O'Grady et al. 2012).

Das Körperwasser weist eine besonders hohe Durchmischungs- und Turnover-Rate von nur wenigen Tagen auf, was den Vorteil hat, dass Veränderungen im $\delta^{18}\text{O}$ -Haushalt des Körpers (z.B. Trinkwasser-/Futter-/Ortswechsel, Stillphase oder klimatische Veränderungen) sich sehr schnell im $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ niederschlagen (Longinelli & Padalino 1980, Schoeller 1990, Bowen et al. 2005, Podlesak et al. 2008, Biondi et al. 2013, Green et al. 2018). Auch saisonale Schwankungen werden so im Körperwasser sichtbar (Kornexl et al. 1997). Dies kann aber auch einen Nachteil darstellen, weil $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ dadurch anfällig für kurzfristige Veränderungen wird und keine langfristigen Mittelwerte abbildet (Boner & Förstel 2004, Green et al. 2018). Durch die isotopische Kurzlebigkeit des Körperwassers reagiert dieses also sensibler auf kurzfristige Veränderungen, was beispielsweise zu saisonalen Unterschieden von über 5 ‰, oder inter-individuellen Abweichungen von über 3.5 ‰ (Standardabweichung: 0.4‰) führen kann (Green et al. 2018). Die Turnover-Rate von Wasser im Körper sinkt mit der Körpergröße (Streit 1982), ist aber auch abhängig vom Aktivitätslevel und weiteren physiologischen und verhaltensabhängigen Faktoren und kann somit auch innerhalb einer Art, innerhalb einer homogenen Population und sogar im selben Individuum stark variieren (Leiper et al. 2001). Green et al. (2018) kam anhand einer Fütterungsstudie an Schafen zu dem Schluss, dass für eine homogene Population großer Herbivorer unter gleichbleibenden Futter- und Trinkwasserbedingungen eine Variation von mindestens 2 ‰ (Standardabweichung: > 1‰) für $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ zu erwarten ist.

Die hohe Durchmischungsrate führt außerdem dazu, dass sich alle Körperflüssigkeiten eines Individuums isotopisch stark ähneln (Bryant & Froelich 1995). Zu geringfügigen Variationen kann es allerdings beispielsweise kommen, wenn ein bestimmtes Gewebe im Vergleich zu anderen metabolisch besonders aktiv ist, sodass dort der Einfluss von $\text{H}_2\text{O}_{\text{metabol}}$ eine größere Rolle spielt.

(2) Keratinöse Gewebe

Haare von Säugetieren bestehen, wie auch Krallen, Nägel, Hufe und Vogelfedern zum größten Teil aus Keratin. Säugetierhaar enthält fast ausschließlich α -Keratin und wird im Zuge des Haarwachstums kontinuierlich nachgebildet (Friedrich & Antranikian 1996, Bowen et al. 2005). Keratin wird im Haarfollikel aus Aminosäuren synthetisiert und bildet die Basis des Haargewebes (Ehleringer et al. 2008). Nach seiner Bildung ist das Gewebe inert, unterliegt also keinem Turnover oder Remodeling mehr (Macko et al. 1999, Kirsanow & Tuross 2011). Somit werden in Haaren (und entsprechenden Materialien) diejenigen Isotopenverhältnisse gespeichert, welche während der Keratinsynthese im Haarfollikel vorherrschen, ohne sich im Anschluss daran noch weiter zu verändern (White 1993, Schwertl et al. 2003, West et al. 2004).

Damit sind Haarproben auch gut für $\delta^{18}\text{O}$ -Analysen zur Herkunfts- oder Klimarekonstruktion geeignet, weil sie Informationen über die zeitliche Abfolge der physiologischen und der Umweltvariation reflektieren (Bowen et al. 2005, Ehleringer et al. 2008, O'Grady et al. 2012). Haare (und Federn) werden besonders häufig in ökologischen oder forensischen $\delta^{18}\text{O}$ -Studien untersucht, da sie nicht-invasiv beprobt werden können und auch bei bereits verstorbenen Individuen noch mit den originalen $\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnissen zugänglich sind, sofern noch keine irreversible diagenetische Verfälschung aufgetreten ist (Friedrich & Antranikian 1996, Fraser et al. 2006, Wolf et al. 2011).

Ein Haar durchläuft im Laufe seiner Entwicklung unterschiedliche Wachstums- und Ruhephasen, was dazu führt, dass nicht alle Haare exakt denselben Zeitraum widerspiegeln (Coplen 1988). Obwohl Haare in unterschiedlichen Raten wachsen, befinden sich jedoch in der Regel die meisten in der Wachstumsphase (Tortora & Derrickson 2017). Je nach Haarlänge und Wachstumsrate, reflektiert $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ einen Zeitraum von mehreren Wochen bis Monaten (Hölzl et al. 2004, Tütken 2010, Lehn & Graw 2014).

Auch im Haar spiegelt sich also indirekt die Isotopie des Umwelt- bzw. Trinkwassers wider. Verschiedene Studien haben lineare (artspezifische) Korrelationen zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ bzw. $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ ermittelt und/oder abgeschätzt, zu welchem Prozentsatz der H_2O -Input die Komposition von $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ beeinflusst (O'Brien & Wooller 2007, Ehleringer et al. 2008, Podlesak et al. 2008, Bowen et al. 2009, Wolf et al. 2011). Obwohl vorgeformtes Wasser demnach signifikant $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ beeinflusst, spielen, wie beim Körperwasser, auch andere Faktoren (O_2 - und Futter-O-Input, CO_2 und H_2O -Output) eine Rolle (Fraser et al. 2006, Ehleringer et al. 2008, Kirsanow & Tuross 2011). Die $\delta^{18}\text{O}$ -Zusammensetzung eines Haares ist tatsächlich stark vom Körperwasser beeinflusst und damit von den verschiedenen In- und Output-Flüssen des Körpers kontrolliert (Ehleringer et al. 2008, Podlesak et al. 2008, O'Grady et al. 2012). Auch zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ lassen sich lineare Zusammenhänge herstellen (O'Brien & Wooller 2007).

$\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ ist allerdings nach den gängigen Modellen keine direkte Funktion des Körperwassers, sondern des Darmwassers (DW) in Magen und Dünndarm. Alle Sauerstoffatome in Aminosäuren sind mit dem C-Terminus (Carbonylgruppe) assoziiert. Dieser Sauerstoff tauscht sich im Zuge der Hydratation (hydrolytische Abspaltung von Aminosäuren und Peptiden) unter sauren Bedingungen (wie sie im Magen vorherrschen) sehr schnell mit dem Sauerstoff des Umgebungswassers aus (Stewart

et al. 2001, Schneider & Hall 2005, Bowen et al. 2009). Nach der Aufnahme in den Darm und den Blutkreislauf findet dann (bei dort vorherrschendem, neutralem pH-Wert) nur noch sehr wenig Austausch statt (Murphy & Clay 1979, Angel & Orlando 2006). Das bedeutet, dass die Sauerstoffatome im Haar der Annahme nach primär aus dem Darmwasser während der Hydrolyse von Nahrungsprotein fixiert werden und zwar ohne direkten Bezug zur ursprünglichen Nahrung (Podlesak et al. 2008, Bowen et al. 2009). Da die Aminosäuren, welche sich im Zuge der Verdauung auf diese Weise isotopisch mit dem Darmwasser austauschen, die Vorstufen für die Proteinbiosynthese in den Haarfollikeln darstellen, ist $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ eine Funktion von $\delta^{18}\text{O}(\text{DW})$ (Ehleringer et al. 2008).

Bei den Interaktionen zwischen Carbonyl-Sauerstoff und Darmwasser kommt es zur Fraktionierung von $\delta^{18}\text{O}$. Der entsprechende Fraktionierungsfaktor zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{DW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ wird mit α_0 bezeichnet. Der Wert von 1.0164 für α_0 wurde mehrfach bestätigt (erstmalig für Mikrosporen, später auch für Säugetiere) und scheint universell für Carbonyl- H_2O -Interaktionen über alle biologischen Systeme hinweg einheitlich zu sein (Kreuzer-Martin et al. 2003, Podlesak et al. 2008, O'Grady et al. 2012). Mit α_0 lässt sich $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ aus $\delta^{18}\text{O}(\text{DW})$ berechnen (Ehleringer et al. 2008, Podlesak et al. 2008, O'Grady et al. 2012):

$$\delta^{18}\text{O}(\text{Haar}) = \alpha_0 \cdot (1000 + \delta^{18}\text{O}(\text{DW})) - 1000$$

Das Darmwasser seinerseits setzt sich aus zwei Fraktionen (Flussraten) zusammen: 1) der aus dem Körper in den Verdauungstrakt sekretierten Flüssigkeit (g_1) (welche isotopisch $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ entspricht) und 2) dem in der Nahrung enthaltenen, noch nicht absorbierten Wasser (TW und $\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}}$) (g_2) (Ehleringer et al. 2008, Podlesak et al. 2008):

$$\delta^{18}\text{O}(\text{DW}) = g_1 \cdot \delta^{18}\text{O}(\text{KW}) + g_2 \cdot \delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}) \quad (\text{mit } g_1 + g_2 = 1)$$

Laut Ehleringer et al. (2008) (in Übereinstimmung mit Malagelada et al. (1976)) setzt sich beim Menschen die Mischung von $\delta^{18}\text{O}(\text{DW})$ zu etwa 57% aus Körperwasser und zu etwa 43% aus Wasser der Nahrung zusammen. Die Werte für g_1 und g_2 sind jedoch abhängig von artspezifischen Faktoren und können nicht pauschal für alle Säugetiere festgelegt werden. O'Grady et al. (2012) gehen zum Beispiel davon aus, dass bei den von ihnen untersuchten Makaken eine sehr hohe Exkretionsrate von Verdauungssaft und ein rapider isotopischer Austausch mit dem Nahrungswasser stattfindet, sodass ein Wert von $g_1 = 1$ (und damit $\delta^{18}\text{O}(\text{KW}) = \delta^{18}\text{O}(\text{DW})$) plausibler ist. Genauso gut ist es denkbar, dass bei Tieren mit hohem Input an vorgeformtem Wasser eher der Anteil von $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O})$ gegenüber $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ dominiert. Es bleibt festzuhalten, dass $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ eine Funktion von $\delta^{18}\text{O}(\text{DW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{DW})$ wiederum eine Funktion von $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O})$ und deren jeweiligen Anteile g_1 und g_2 ist.

Bei der Messung von $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ -Proben ist zu beachten, dass Haare innerhalb kürzester Zeit nicht-metabolisches H_2O aus der Atmosphäre aufnehmen. Diese Kontamination mit atmosphärischem Fremdwasser kann signifikante Veränderungen in $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ bewirken. Durch Vakuumtrocknung vor der Messung kann dieses Fremdwasser jedoch wieder erfolgreich entfernt werden (Bowen et al. 2005).

(3) Mineralisierte Hartgewebe

Sauerstoff und seine stabilen Isotope finden sich in Knochen und Zähnen sowohl im biologischen Apatit, als auch im Kollagen. Im Zahnschmelz ist der Anteil an organischen Bestandteilen allerdings deutlich geringer. Sowohl die organische, als auch die anorganische Phase des Knochens kann für $\delta^{18}\text{O}$ -Analysen verwendet werden. Besonders bei archäometrischen oder Paläoklimastudien kommen Skelettelemente als Probenmaterial zum Einsatz, weil sie lange erhalten bleiben und auch die

isotopische Signatur des Sauerstoffs über lange Zeiträume speichern (Ayliffe et al. 1992, Daux et al. 2008, Pederzani & Britton 2018). Nichtbiologischer Hydroxylapatit hat die Formel $\text{Ca}_{10}[\text{PO}_4]_6[\text{OH}]_2$.

Biologischer Apatit hingegen besitzt eine komplexere Formel, in der viele weitere Elemente und Moleküle für die drei Ionen im Hydroxylapatit substituieren können. Sie kann als $[\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Na}, \text{etc.}]_5[\text{PO}_4, \text{HPO}_4, \text{CO}_3]_3[\text{CO}_3, \text{H}_2\text{O}, \text{OH}, \text{F}, \text{Cl etc.}]$ angenähert beschrieben werden (Montel et al. 1981, Wilson et al. 1999, Elliott 2002, Pan & Fleet 2002, Elliott 2013, Greiner et al. 2019). Sauerstoff findet sich dort in der Phosphat-, der Hydroxyl- und der Karbonatgruppe (welche sowohl für PO_4^{3-} als auch für OH^- substituieren kann). Isotopisch untersucht werden davon meist Karbonat und Phosphat, wobei Phosphat allgemein als stabiler gegenüber diagenetischer Einflüsse gilt (Iacumin et al. 1996, Sponheimer & Lee-Thorp 1999, Kohn & Cerling 2002, Zazzo et al. 2004, Lee-Thorp 2008, Martin et al. 2008). Beide Anionen präzipitieren im isotopischen Gleichgewicht mit dem Körperwasser in Abhängigkeit von der Temperatur und spiegeln damit dieselben Einflüsse von In- und Outputs, sowie artspezifischer und äußerer Faktoren wider (Luz et al. 1984, d'Angela & Longinelli 1990, Bryant & Froelich 1995, Iacumin et al. 1996, Sponheimer & Lee-Thorp 1999, Martin et al. 2008, Kirsanow & Tuross 2011).

Bei konstanter Körpertemperatur, wie sie bei Säugetieren gegeben ist (ca. 37°C), ist auch die Fraktionierung zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ bzw. $\delta^{18}\text{O}(\text{CO}_3^{2-})$ konstant, jedoch gelten für Karbonat und Phosphat jeweils unterschiedliche Fraktionierungsfaktoren (d'Angela & Longinelli 1990, Bryant & Froelich 1995, Pucéat et al. 2010, Cossins 2012, Lécuyer et al. 2013, Chang & Blake 2015). D'Angela & Longinelli (1990) ermittelten für $\alpha_{\text{PO}_4\text{-KW}}$ ungefähre Werte zwischen 1.0172 und 1.0175 für Säugetiere aus mehreren verschiedenen Taxa (in Übereinstimmung mit chemisch ermittelten Daten von Longinelli & Nuti (1973) für die Fraktionierung zwischen Phosphat und Wasser bei 37-39°C). Zu ähnlichen Ergebnissen kamen auch Podlesak et al. (2008) ($\alpha_{\text{PO}_4\text{-KW}} \approx 1.0180$) und Luz & Kolodny (1985) ($\alpha_{\text{PO}_4\text{-KW}} \approx 0.0178$) für kleine Säugetiere. Abweichend davon gibt Longinelli (1984) basierend auf Daten zu Hausschweinen einen Wert von 1.0209 für $\alpha_{\text{PO}_4\text{-KW}}$ an.

Der Unterschied zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{CO}_3^{2-})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ kann ebenfalls artabhängig variieren und beträgt in etwa 8-12 ‰, allerdings kann es auch hier zu Variationen kommen (Bryant et al. 1996, Iacumin et al. 1996, Martin et al. 2008, Kirsanow & Tuross 2011, Pellegrini et al. 2011).

Die geografischen bzw. klimatischen Muster, die $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ bestimmen, werden also im $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ des Knochen- bzw. Zahnschmelzminerals reflektiert (Longinelli 1984, Green et al. 2018). Es wurden in vielen Studien, genauso wie für $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ lineare Korrelationen ermittelt, welche diese (artspezifische) Beziehung von $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ zu $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ bzw. $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ beschreiben (Longinelli 1984, Luz et al. 1984, Luz & Kolodny 1985, Levinson et al. 1987, d'Angela & Longinelli 1990, Luz et al. 1990, Ayliffe et al. 1992, Bryant et al. 1994, Chillón et al. 1994, Daux et al. 2008). Da eine unmittelbare Abhängigkeit vom Körperwasser gegeben ist, stellen lineare Gleichungen auch für $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ (und $\delta^{18}\text{O}(\text{CO}_3^{2-})$) starke Vereinfachungen dar, welche die anderen Einflüsse, die $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ bestimmen, nicht als veränderliche Variablen berücksichtigen. Komplexere Massebilanzmodelle können beispielsweise $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ über das Körperwasser detaillierter schätzen, sofern ausreichend Daten und Hintergrundinformationen zur Art und den Lebensbedingungen gegeben sind (Luz et al. 1984, Bryant & Froelich 1995, Kohn 1996, Daux et al. 2008). Auch hier gilt weiterhin, dass größere Arten mit hohem Trinkwasserbedarf $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ am stärksten reflektieren (Altman & Dittmer 1968, Bryant & Froelich 1995, Kohn 1996).

Eine bedeutende Eigenschaft für das Verständnis der Sauerstoffisotopenverhältnisse von Zähnen und Knochen sind ihre spezifischen Bildungszeiträume und Turnover-Raten. Dabei ist zwischen Zahnschmelz und Knochen zu unterscheiden (Pederzani & Britton 2018). Zahnschmelz ist, so wie Haare, biologisch inert. Das bedeutet, dass er nach der Mineralisierung keiner weiteren isotopischen

Veränderung mehr unterworfen ist (Dean 1987, White et al. 2004, Hillson 2005). Da sich die Zähne von Säugetieren oft nach gut bekannten Mustern und zu sehr bestimmten Zeiten bilden, kann genau bestimmt werden, welcher Zeitraum im Leben eines Individuums von einem untersuchten Zahntyp isotopisch repräsentiert wird (Fricke et al. 1998, Tütken 2010). Bei Zähnen, die sich innerhalb kurzer Zeiträume bilden, kann so auch kurzfristige und saisonale Variation oder ein Wechsel der Ernährungsweise isotopisch festgehalten werden (Fricke et al. 1998, Sharp & Cerling 1998, Daux et al. 2008, Balasse et al. 2012, Frémondeau et al. 2012). Knochen hingegen wird im Laufe des Lebens kontinuierlich erneuert (Remodeling), auch nach Abschluss der Wachstumsphase (Martin & Burr 1989, Meghji 1992, Walsh et al. 2003).

Die Turnover- bzw. Remodeling-Raten von Knochengewebe sind abhängig von Alter, Gesundheitsstatus und Aktivitätslevel des Individuums, sowie vom Knochentyp (Weiler 2005, McNamara & Prendergast 2007, Martin & Seeman 2008, Eriksen 2010, Fahy et al. 2017, Pederzani & Britton 2018). Allgemein sind die Turnover-Raten im Vergleich zu vielen anderen Geweben deutlich geringer, wodurch das Knochenmineral stets einen gewichteten Mittelwert der isotopischen Informationen über einen langen Zeitraum von mehreren Jahren bis Jahrzehnten abbildet (Libby et al. 1964, Manolagas 2000, Copley et al. 2004, Pearson & Lieberman 2004). Dadurch ist der $\delta^{18}\text{O}$ -Wert des Knochenminerals meist viel einheitlicher als die anderer Körperbestandteile, weil saisonale und kurzfristige Schwankungen gemittelt werden, zumindest bei ausreichend alten Individuen (Tütken 2010). Entsprechend stellen sich langfristige Veränderungen, die den $\delta^{18}\text{O}$ -Haushalt beeinflussen, wie etwa ein Ortswechsel, erst nach einiger Zeit im Knochen ein.

(4) Milch und Stilleffekt

Wie bereits angedeutet spielen für die Sauerstoffisotopenzusammensetzung von Körpergeweben auch ontogenetische Faktoren eine Rolle. Dazu gehört beispielsweise die Körpergrößenabhängigkeit vieler In- und Outputs. Die entsprechenden Zusammenhänge sind in der Regel nicht linear mit der Körpermasse verlinkt, sondern folgen allometrischen Größenfunktionen (Schmidt-Nielsen 1964, Davies et al. 1984, Nagy & Peterson 1988, Weibel et al. 2004). Dies ist nicht nur bei Arten verschiedener Größen zu beachten, sondern auch beim individuellen entwicklungsbedingten Wachstum (Walstra 1980, Bryant & Froelich 1995, Weiler 2005).

Ein weiterer entwicklungsbedingter Aspekt beim $\delta^{18}\text{O}$ -Haushalt eines Säugetieres ist der sogenannte Stilleffekt. Dieser beschreibt die Tatsache, dass Körpergewebe, welche (vollständig oder teilweise) während der Stillzeit gebildet werden, an ^{18}O angereichert sind (Lin et al. 2003, Pederzani & Britton 2018). Dies gilt grundsätzlich für den gesamten Organismus. Ein infantiles Individuum, welches noch gesäugt wird, weist also in allen Körperteilen, inklusive Körperwasser und sämtlichen Weichgeweben, sowie in Haaren und mineralisierten Hartgeweben, erhöhte $\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnisse auf. Dies gilt zumindest wenn seit der Geburt bereits genügend Zeit vergangen ist, sodass durch Turnover und Wachstum auch die sich langsam verändernden Gewebe bereits signifikant auf den Input an Muttermilch reagiert haben (Roberts et al. 1988, Wright & Schwarcz 1998, White et al. 2000, Williams et al. 2005). Während Zähne, deren Kronen im Verlauf der Stillphase mineralisieren, den Stilleffekt dauerhaft bis zum Tode speichern, wird er in allen anderen Geweben nach dem Abstillen immer weiter abgeschwächt und ist spätestens im Erwachsenenalter in allen Körperteilen meist vollständig verschwunden (Wright & Schwarcz 1998, White et al. 2004). Wie schnell dieser Wechsel vonstattengeht ist abhängig von der Wachstums- und Turnover-Rate des jeweiligen Gewebes. In langsam wachsenden Geweben mit geringen Turnover-Raten erhält sich der Stilleffekt am längsten, wohingegen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ beispielsweise

bereits wenige Tage nach dem Übergang zu fester Nahrung und Trinkwasser im Gleichgewicht mit den neuen Input-Quellen steht (Pederzani & Britton 2018).

Milch ist ein in flüssiger Form abgegebenes Körpersekret (wie auch Schweiß oder Urin) und entspricht demnach isotopisch dem $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Wert der Mutter (Bryant & Froelich 1995, Ehtesham et al. 2015, Chen & Auerswald 2018). Da bei gestillten Jungtieren die Muttermilch einen Großteil des Nahrungs-Inputs ausmacht, entsteht so ein Trophiestufeneffekt: Anstatt Trinkwasser wird (zumindest in der ersten Stillphase) sämtliches Wasser in Form von $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}}) = \delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Milch}}) = \delta^{18}\text{O}(\text{KW}_{\text{Mutter}})$ aufgenommen, welches (wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben) aufgrund mehrerer Faktoren (Bildung von $\text{H}_2\text{O}_{\text{metabol}}$ aus Futter-O und O_2 , fraktionierter evaporativer Verlust an $\text{H}_2\text{O}_{\text{dampf}}$ und CO_2 , etc.) gegenüber $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ angereichert ist (Kornexl et al. 1997, Wright & Schwarcz 1998, Rossmann 2001, Ehtesham et al. 2015, Green et al. 2018). *In utero* spielt dieser Effekt noch keine Rolle, da der Kreislauf der Mutter dort noch mit dem des Fötus verbunden ist, ohne dass zusätzliche äußere Einflüsse eine Rolle spielen. Bis zur Geburt kann der Embryo isotopisch sozusagen als „Organ“ des Muttertieres verstanden werden (Bryant & Froelich 1995, Kohn 1996). Nach der Geburt kommen für das Individuum neben dem Input an $\delta^{18}\text{O}(\text{KW}_{\text{Mutter}})$ jedoch weitere In- und Output-Größen hinzu: Das Neugeborene beginnt eigenständig zu atmen, und somit $\delta^{18}\text{O}(\text{O}_2)$ aus der Atmosphäre aufzunehmen und $\delta^{18}\text{O}(\text{CO}_2)$, sowie $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Atem}})$ abzugeben. Außerdem wird Wasser von da an auch evaporativ (und somit fraktioniert) über Haut und Atem ($\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Transkutan}})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Atem}})$) abgegeben (Luz et al. 1984, Kohn 1996). Da der Input an flüssigem Wasser (welcher, wie zuvor erwähnt, in den meisten Säugetieren den größten Sauerstoff-Input ausmacht) bereits vor der Aufnahme durch den Säugling isotopisch angereichert ist, sind folglich $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ und der $\delta^{18}\text{O}$ -Wert aller damit in Verbindung stehender Gewebe zusätzlich mehr oder weniger stark erhöht (Bryant & Froelich 1995, Kornexl et al. 1997, Green et al. 2018).

Dabei müssen die Anreicherungsvorgänge, welche im Jungtier stattfinden, quantitativ nicht jenen entsprechen, die im Muttertier ablaufen. Das liegt daran, dass sich junge Individuen physiologisch und vor allem in ihrer Körpergröße signifikant von adulten unterscheiden, zum Beispiel bezüglich Wasserhaushalt und Respirationsquotient (Kleiber 1961, Schmidt-Nielsen 1997). Dadurch sind auch die relativen Flussraten und Fraktionierungsvorgänge verschieden (Bryant & Froelich 1995). Hinzu kommt, dass infantile Individuen sich im Gegensatz zu adulten im Wachstum befinden. Ihr Stoffhaushalt ist also nicht ausgeglichen (Summe der Inputs \approx Summe der Outputs), sondern die Inputs überwiegen gegenüber den Outputs deutlich (Davies et al. 1984, Bryant & Froelich 1995).

Der Stilleffekt ist in der Folge nur schwer quantitativ vorherzusagen: artspezifische Variablen spielen eine Rolle, aber auch ontogenetische, individuelle und klimatische. So kann der Stilleffekt beispielsweise wetter- oder saisonabhängig stärker oder schwächer ausfallen, wenn die Außenbedingungen zu einem mehr oder weniger ausgeprägten Verlust an fraktioniertem Wasserdampf beitragen (Green et al. 2018).

Roberts et al. (1988) geben an, dass der Urin (also $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$) von gestillten Kindern gegenüber solchen, die mit der Flasche gefüttert wurden (Milchpulver mit $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ angerührt) um 1.85 ‰ erhöht ist. Für die isotopische $\delta^{18}\text{O}$ -Anreicherung durch den Stilleffekt im Phosphat früh mineralisierender (menschlicher) Zähne aus archäologischem Fundgut wurden Werte von ca. 0.5-1.6 ‰ gemessen (Wright & Schwarcz 1998, Wright & Schwarcz 1999, White et al. 2000, White et al. 2004, Dupras & Tocheri 2007, Gregoricka 2014).

Menschlicher Knochen von Säuglingen kann um mehr als 1 ‰, bis hin zu 1.8 ‰ gegenüber dem von adulten Individuen angereichert sein (White et al. 2004, Britton et al. 2015). Allgemein gilt für $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ in Zähnen und Knochen des Menschen ein Richtwert von ca. 0.7 ‰ Anreicherung durch den Stilleffekt (White et al. 2004). Grundsätzlich ist der Stilleffekt für die meisten Arten aber nur

unzureichend erforscht und aus oben bereits erwähnten Gründen auch innerartlich potentiell sehr variabel (Pederzani & Britton 2018). Zu Variation kommt es auch dadurch, dass die Stillphase unterschiedlich lang und intensiv sein kann: selbst innerhalb derselben Art kann die Dauer des Stillens deutlich schwanken und auch der Zeitpunkt und die Menge zusätzlich zugeführter fester Nahrungsanteile im Zuge des Abstillens ist variabel (Dettwyler & Fishman 1992, Lutter 1992, Williams et al. 2005). Hinzu kommt, dass unterschiedliche Gewebe und selbst unterschiedliche Zahntypen zu verschiedenen Zeiten mineralisieren, die sich mehr oder weniger stark mit der Stillzeit überschneiden können. Ein Zahn der vollständig während des Stillens mineralisiert wird dann den stärksten Stilleffekt und somit auch die höchste $\delta^{18}\text{O}$ -Anreicherung aufweisen, wohingegen ein später gebildeter Zahn auch isotopische Informationen aus der Zeit nach dem Abstillen enthalten kann. Genauso kann ein Milchzahn teilweise (oder ganz) die nicht-angereicherte Isotopie *in utero* widerspiegeln (Wright & Schwarcz 1998). Für eine sinnvolle Quantifizierung des Stilleffekts sind neben allometrischen und physiologischen Aspekten also auch die Zeitspannen zu berücksichtigen, die die jeweiligen Gewebe abbilden.

II. Fütterungsstudie, Material und Methoden

A. Ablauf des Fütterungsexperimentes, Beprobung und Lagerung der Proben

Es wurden Proben von insgesamt 14 Versuchstieren der Rasse Schwäbisch Hällisches Landschwein genommen und untersucht. Sie stammten alle von demselben Wurf Ferkel, um die genetische und zeitliche Variation zu minimieren. Die Schweine kamen alle vom Biohof Scherm (Höllmannsried 41, 94259 Kirchberg im Wald). Sowohl die untersuchten Ferkel und Schweine, als auch die Muttersau lebten von der Geburt bis zum Tod ausschließlich auf dem Versuchshof. Die Tiere wurden in einem Außenklimastall gehalten, was bedeutet dass sie den jahreszeitlichen Temperaturschwankungen in hohem Maße ausgesetzt waren. Die ersten Wochen nach der Geburt wurden die Ferkel allerdings mit einer Wärmelampe bestrahlt (siehe **Abbildung 9**). Anschließend wurden sie etwa bis zur 12-14 Lebenswoche getrennt von der übrigen Herde gehalten und gefüttert (**Abbildung 10**). Danach konnten die Tiere sich frei auf dem Gelände bewegen, welches den Stall und die angrenzende Weide umfasste (**Abbildung 11**).



Abbildung 9 Vier Tage alte Versuchstiere mit Muttersau in Ferkelbox unter Wärmelampe.



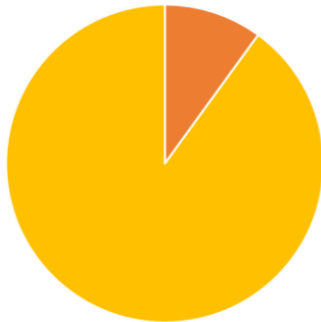
Abbildung 10 Zwei Monate alte Versuchstiere in der separaten Ferkelbox.



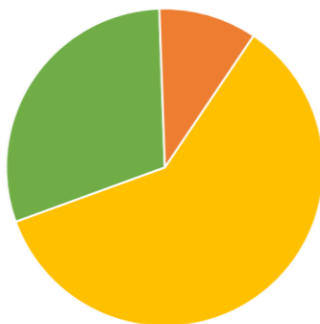
Abbildung 11 Adulte Versuchstiere im Außengehege des Hofes.

1. Futter, Trinkwasser und Boden

Muttersau (Trächtigkeit und Stillphase)



Abgestillte Ferkel (> 6-8 Wochen)



Begrenztes Hochenergiefutter
(12-14 Wochen bis Schlachtung)

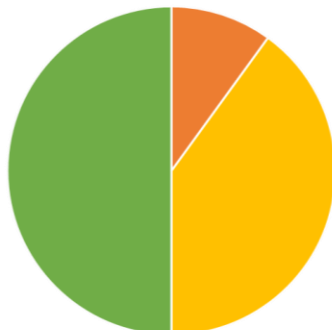


Abbildung 12 Altersbedingte Änderung der Futterzusammensetzung bei den untersuchten Schweinen. Hochenergiefutter (gelb) war Hauptbestandteil der Nahrung der Muttersau während Trächtigkeit und Stillphase (ca. 90 %). Der Anteil des Hochenergiefutters wurde dann zunehmend durch Niedrigenergiefutter (grün) ersetzt, bis das Niedrigenergiefutter ca. 50 % und das Hochenergiefutter ca. 40 % ausmachte. Die Brot-Molke-Mischung (orange) wurde konstant zu ca. 10 % in allen Lebensphasen konsumiert.

Das Futter der Versuchstiere bestand aus einer Mischung folgender Bestandteile: Getreidemischung (geschrotet, mit Mineralfutterzusatz), Gras, Silage, Brot, Molke und Kartoffeln, sowie bestimmten geringen Anteilen an gefressenem Einstreu (Stroh und Heu) und Obst (Äpfeln). Einstreu und Äpfel wurden nur sporadisch und in vernachlässigbaren Mengen verzehrt. Die übrigen Futtermittel wurden in drei Kategorien unterteilt:

Die mit dem Mineralfutterzusatz versetzte Getreidemischung und die Kartoffeln wurden als „Hochenergiefutter“ definiert, also solche Futtertypen die große Mengen verdaulicher und energiereicher Nährstoffe enthielten. Gras und Silage hingegen sind schwerer verdaulich und energieärmer und wurden deshalb unter dem Begriff „Niedrigenergiefutter“ zusammengefasst. Über die Lebenszeit der untersuchten Schweine wurden diese beiden Futterkategorien nicht in gleichbleibenden Anteilen zueinander verfüttert, wie **Tabelle 3** zu entnehmen und in **Abbildung 12** zu erkennen. Für die sehr frühen Lebensphasen muss die Ernährung der Muttersau hinzugezogen werden, da die Testindividuen während der Trächtigkeit und Stillphase ihre Nahrung aus deren Körper bezogen. Der Anteil des Niedrigenergiefutters (grün) in der Nahrung der Tiere stieg von null Prozent (bei der Fütterung der Muttersau während der Trächtigkeit und Stillphase) bis hin zu fünfzig Prozent (ab einem Alter der Ferkel von ca. 12-14 Wochen bis zur Schlachtung), während der Anteil des Hochenergiefutters (gelb) gleichzeitig von ca. neunzig Prozent (Muttersau) auf vierzig Prozent (ab einem Alter von ca. 12-14 Wochen) sank. Der Anteil der dritten Futterkategorie, die aus den stets gemeinsam verfütterten Bestandteilen Brot und Molke (orange) bestand, blieb über die gesamte Lebenszeit der Individuen in etwa konstant bei ca. zehn Prozent.

Die genauen Mengen und Prozentanteile der einzelnen Nahrungsquellen, welche auch tatsächlich von den einzelnen Tieren gefressen wurden, konnten nicht exakt gemessen werden und wurden daher anhand der Angaben des Hofbetreibers geschätzt. Einige der Futtermittel waren in der unmittelbaren Umgebung, also auf den Anbauflächen des Versuchshofes selbst produziert (Gras, Silage, Äpfel und gewisse Bestandteile der Getreidemischung), andere wurden von lokalen und regionalen Anbietern zugekauft (Kartoffeln, Getreide, Mineralfutter).

Tabelle 3 Fütterung der Versuchstiere in den verschiedenen Lebensphasen. Nach dem Abstillen wurden die Tiere zunächst ad libitum gefüttert, nach ca. 12-14 Wochen wurde der Zugang zum Kraftfutter (Getreideschrot, Brot und Molke) begrenzt. Der Anteil der Brot-Molke-Mischung blieb in etwa konstant bei um die 10 %.

Phase	Zeitraum (in Tagen)		Futterzusammensetzung	(bis zu) Gewicht	Zeitpunkt Gewicht (in Tagen)
Trächtigkeit (und Stillphase)	-108	0	Muttersau: Getreideschrot: 85-94% Brot: 6-1% Einstreu: 0,6-1,5%	1kg	0
Stillphase	0	21	Muttermilch: 100-95%	-	-
Übergangsphase: Muttermilch – Futter	21	42-56	Muttermilch: >95% → <5% Futter: <5% → >95%	5kg	35-42
Ad libitum Zugang zu „Kraftfutter“	42-56	84-98	Prozentanteil an Hoch- energiefutter hoch (ca. 60%).	25-30kg	84-98
Restriktive Fütterung des „Kraftfutters“	84-98	423	Prozentanteil an Hoch- energiefutter deutlich niedriger (ca. 40%).	90- 105kg	388-423

Beim Trinkwasser handelte es sich um Grundwasser aus einer lokalen Quelle. Um mögliche Einflüsse von Schwebstoffen und Regenwasser einschätzen zu können, wurde an jedem Beprobungstag, neben dem frischen Quellwasser auch eine Wasserprobe aus dem Becken der Haupttränke im Außenbereich, sowie aus der Tränke im Stall genommen. Die beiden Tränken wurden aus dem Wasser der Quelle bespeist. Zudem wurde zu Vergleichszwecken auch das örtliche Leitungswasser beprobt, welches teilweise in extremen Trockenphasen zum Tränken der Tiere verwendet wird. Das Trinkwasser und das angebotene Futter stand den Tieren *ad libitum* zur Verfügung, wobei die Wassermenge unbegrenzt war, das Futter dagegen zum Teil nur in bestimmten Mengen angeboten wurde (s. **Tabelle 3**).

Futter und Trinkwasserproben wurden im Abstand von zwei Wochen über die Dauer des gesamten Experiments genommen. Es wurde zu Beginn der Studie auch eine Probe des Kolostrums in einer Kunststoffspritze aufgefangen und für die Untersuchung eingelagert. Das Trinkwasser wurde an jedem Beprobungstag zu zwei Tageszeiten (morgens und nachmittags) abgefüllt, um mögliche temperatur- oder witterungsbedingte Schwankungen in den Sauerstoffisotopenverhältnissen abschätzen zu können. Die festen Futterproben wurden in luftdicht verschließbare Plastik-Probenbeutel gefüllt, die Molke und das Trinkwasser in ebenfalls luftdicht verschließbare Zellkulturflaschen (250 mL) bzw. Plastikfläschchen. Beim Befüllen der Wasser- und Molkeprobenbehälter wurde darauf geachtet, die Fläschchen möglichst voll zu machen, damit so wenig Luft wie möglich darin zurückblieb, mit der sich die Probe eventuell austauschen und somit bezüglich ihres Sauerstoffisotopenverhältnisses verändern könnte.

An jedem Beprobungstag wurden folgende Daten vor Ort festgehalten: Datum, Bearbeiter, Uhrzeit, Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit und eine kurze Beschreibung der jeweiligen Wetterverhältnisse. So sollten Variablen dokumentiert werden, die möglicherweise Einfluss auf die gemessenen Isotopenverhältnisse des Sauerstoffes haben könnten. Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchte wurden mit einer Wetterstation gemessen, welche in einem überdachten Bereich der Weide aufgestellt wurde. Die Daten wurden erst aufgezeichnet, nachdem sich das Gerät nach einer Vorlaufzeit von mindestens einer halbe Stunde an die Bedingungen angepasst hatte. Das Gerät selbst wurde im Außenklimastall gelagert.

Nach Entnahme wurden die Futterproben bis zur Bearbeitung bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ eingefroren, die Trinkwasserproben bei $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ unter Lichtausschluss im Kühlraum gelagert. Von den Trinkwasser- und Futterproben wurde eine bestimmte, nach Möglichkeit repräsentative Anzahl für die weitere Bearbeitung und spätere Messungen ausgewählt. Die übrigen Proben dienten als Referenz und Material für evtl. fällige Nachmessungen bzw. weiterführende Untersuchungen.

Zusätzlich wurden als Umweltproben die lokalen Böden untersucht. Hierfür wurden insgesamt 16 Erd- und Bodenproben von den Anbauflächen bzw. direkt von den Nahrungsmitteln entnommen. Grund waren eine mögliche Aufnahme von Boden durch die Tiere im Zuge der Nahrungsaufnahme und die Relation zwischen Boden, Wasser und Futter abschätzen zu können. Die Bodenproben wurden auf dem Hof bzw. der Weide aus unterschiedlichen Bodenschichten und -tiefen entnommen, bei Proben von Anbauflächen wurde die Erde entweder direkt vom Futter (z.B. Kartoffeln) abgenommen, oder aus einer Tiefe des Ackers, die in etwa mit der Wurzeltiefe der angebauten Futtermittel übereinstimmte. Die Erdproben wurden in Plastik-Probenbeuteln aufgefangen und bis zur weiteren Bearbeitung aufbewahrt. **Tabelle 4** ist zu entnehmen, wie viele Proben welchen Typs (Wasser, Futter, Boden) für die jeweiligen Untersuchungen entnommen wurden und für wie viele davon Messergebnisse für diese Arbeit generiert wurden.

Tabelle 4 Übersicht über die Beprobung und die jeweilig am Probenmaterial durchgeführten Messungen.

Material	Typ	Anzahl genommener Proben	Messung	Anzahl gemessener Proben
Boden		16	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	16
			Sr-Konzentration	8
Wasser		104	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	8
			Sr-Konzentration	4
			$\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$	28
Futter	Kolostrum	1	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	1
	Getreide	26	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	6
			Sr-Konzentration	1
			$\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$	1
	Getreide, Einzelbestandteile	20	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	15
			Sr-Konzentration	10
	Gras	19	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	12
			Sr-Konzentration	1
			$\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$	3
			$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$	2
	Silage	18	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	5
			Sr-Konzentration	1
			$\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$	1
	Kartoffeln	16	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	6
			Sr-Konzentration	1
			$\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$	4
			$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$	1
	Molke	12	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	4
			Sr-Konzentration	2
			$\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$	2
			$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$	1
	Brot	25	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	5
			Sr-Konzentration	1
	Brot mit Molke	5	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	3
			Sr-Konzentration	1
			$\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$	2
			$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$	1
	Stroh / Heu / Einstreu / Sonstiges	18	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	5
			Sr-Konzentration	2
			$\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$	2
Schwein	Knochen	24	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	24
			Sr-Konzentration	2
			$\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$	24
	Zähne	20	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	14
			Sr-Konzentration	2
			$\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$	14
	Borsten	24	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	4
			Sr-Konzentration	2
			$\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$	10
	Blut	24	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	3
			Sr-Konzentration	1
	Fleisch	11	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	12
			Sr-Konzentration	6
			$\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$	11
			$\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$	10
	Organe	12	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	15
			Sr-Konzentration	6
			$\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$	12
			$\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$	12

2. Proben von den Schweinen

Die Tiere des Testwurfes wurden mit Ohrmarken für diesen Versuch gesondert und individuell mit Kunststoffohrmarken markiert. Sechs der anfänglich 14 Ferkel wurden genauer beprobt und untersucht. Von den übrigen wurden lediglich jeweils zwei Blut- und Borstenproben im Abstand von drei Monaten genommen. Um die Borsten zu gewinnen, wurden die entsprechenden Tiere mit einem Elektrorasierer an einer Stelle des hinteren Rückenbereiches rasiert und die Borsten in luftdicht verschließbaren Kunststoffgefäßen („Urinprobenbecher“) aufgefangen. Das Blut wurde vom zuständigen Amtstierarzt Herrn Dr. Ziegler, dem Geschäftsstellenleiter und Verantwortlichen für den Bereich Schweine des Tiergesundheitsdienstes Kreis Deggendorf direkt aus der Halsvene (*Arteria carotis communis*) entnommen und in S-Monovetten (mit EDTA) gefüllt, wofür die Tiere auf einem Tisch fixiert wurden (**Abbildung 13**).



Abbildung 13 Blutentnahme am fixierten Ferkel durch den Amtstierarzt.

Von den sechs genauer untersuchten Schweinen waren fünf weiblich und nur eines männlich. Zwei der sechs umfassender untersuchten Tiere verstarben frühzeitig, eines eine Woche und das andere drei Wochen nach der Geburt. Damit konnten die Zeiträume der frühen Lebensphase im Probenmaterial repräsentiert werden. Zum Zeitpunkt der Schlachtung bzw. des Todes war die Markierung bereits verlorengegangen, sodass die näher untersuchten Tiere keinem der zuvor *in vivo* auf Blut und Borsten untersuchten Individuen zugeordnet werden konnten. Die Ferkel wurden direkt nach dem Tod komplett eingefroren und so bis zur Sektion gelagert. Von den übrigen vier Schweinen wurden jeweils zwei nach 13 bzw. 14 Monaten für kommerzielle Zwecke geschlachtet und im Zuge dessen beprobt.

Die Schlachtung fand im Städtischen Schlachthof Zwiesel (Waldbahnstraße 8, 94227 Zwiesel) unter Einhaltung der entsprechenden Vorschriften (Tierschutz-Schlachtverordnung 2012) statt. Da die

Schweine sozialisiert und an den Menschen gewöhnt waren, verlief der Transport zum Schlachthof weitgehend ohne größere Stressbelastung. Die Schweine wurden per Elektroschock betäubt und anschließend durch einen gezielten Stich in die Aorta ausgeblutet. Dabei wurden Blut- und Borstenproben entnommen. Vom Blut wurden 250 mL in Zellkulturflaschen abgefüllt, bevor es gerinnen konnte und die Proben anschließend auf Eis gelegt.

Die Borstenproben wurden in Urinprobenbechern aufgefangen, luftdicht verschlossen und ebenfalls auf Eis gelegt. Anschließend wurden die Tiere abgebrüht, um die Borsten zu entfernen und daraufhin die inneren Organe entfernt. Nachdem diese von der zuständigen Tierärztin begutachtet worden waren, wurden Herz, Leber und Niere beprobt. Dies geschah, indem die entsprechenden Teile vom Personal des Schlachtbetriebs in Plastik vakuumverschweißt und daraufhin direkt für den Transport

auf Eis gelegt wurden. Der verbliebene Schlachtkörper wurde mit Wasser gereinigt und in zwei Hälften geteilt. Vor dem Abhängen wurde der Kopf entfernt und jeweils die linke Kopfhälfte in einer großen Plastiktüte auf Eis gelegt. Die Beprobung der Extremitäten konnte aus Gründen des Arbeitsablaufes des Schlachters erst nach dem vier- bis fünftägigem Abhängen im Kühlhaus bei 4 °C erfolgen. Es wurde dann ein Querschnitt des entsprechenden Beines mit Knochen und Muskelfleisch angefertigt, eingeschweißt und auf Eis gelegt bzw. eingefroren. Ebenso wurde mit den dazugehörigen Schweinefüßen verfahren. Nach dem Transport wurden alle entnommenen Teile bis zur weiteren Verarbeitung umgehend bei -20° C eingefroren bzw. sofort weiter beprobt. Ausgeschiedene Körperflüssigkeiten, wie Urin oder Speichel wurden nicht beprobt, da dies einen zu großen Arbeitsaufwand und eine zu hohe Stressbelastung für die Tiere bedeutet hätte.

a) Sektion und Probenentnahme

Die verstorbenen Ferkel und Teile der geschlachteten Schweine wurden direkt nach dem Auftauen sezziert und entsprechend beprobt. Von den frühzeitig gestorbenen Ferkeln (eine bzw. drei Wochen alt) wurden Proben von Femur, zugehörigem Muskelfleisch, Pars petrosa (externe Bestandteile, nicht vom Canalis spiralis cochleae), Mandibel und Milchzähnen untersucht. Bei den geschlachteten Schweinen wurden ebenfalls Langknochen und zugehöriges Muskelfleisch, Pars petrosa und Mandibel verwendet, sowie Molaren des Dauergebisses, der Kaumuskel (Musculus masseter) und die inneren Organe Herz, Leber und Niere. Außerdem wurden von den geschlachteten Schweinen auch Blut und Borsten näher untersucht. Nachdem die Tiere bzw. Teile unter deionisiertem Wasser gründlich von außen gewaschen worden waren, wurden, unter Anleitung einer fachkundigen Präparatorin (Dr. Michaela Hofmann), mit einem handelsüblichen Präparierbesteck zu beprobende Knochen isoliert und weitestgehend entfleischt, die Organproben von Herz, Leber und Niere entnommen und das Beinmuskelfleisch, sowie der Musculus masseter herauspräpariert (**Abbildung 14, Abbildung 15**). Die einzelnen Schritte der durchgeführten Sektionen und Präparationen finden sich in **Tabelle 5**.

Tabelle 5 Sektionsbeschreibung für die frühzeitig verstorbenen Ferkel (Ind. 1 und 2) und die linken Kopfhälften, Beine und Füße der geschlachteten Tiere (Ind. 3-6).

Ferkel (Ind. 1 und 2)	Schweine (Ind. 3-6)
Ventraler Schnitt vom Kinn bis zum Nabel, um Nabel Y-förmig herumschneiden, Haut zu beiden Seiten mit dem Skalpell lösen	Entfleischen des Beinquerschnittes
Eröffnung der Brusthöhle	Entnahme von Beinmuskelfleisch
Entnahme von Gewebsflüssigkeit und Blut aus der Körperhöhle mit Einwegpipette	Entfleischen der Schweinefüße
Entnahme von teilweise geronnenem Blut aus den Vorhöfen des Herzens	(Blut bereits bei Schlachtung entnommen)
Entnahme des Herzens	(Herz bereits bei Schlachtung entnommen)
Eröffnung der Bauchhöhle (unterhalb des Zwerchfells)	(Innere Organe bereits bei Schlachtung entnommen)
Entnahme der linken Niere	(Nieren bereits bei Schlachtung entnommen)
Entnahme des kompletten linken Hinterbeins samt Haut	(Bein als Querschnitt geliefert)
Entnahme der Leber	(Leber bereits bei Schlachtung entnommen)
Abtrennen des Kopfes unterhalb des Atlas, Verwerfen des Postcraniums	(Kopf(-hälfte) bereits bei Schlachtung entnommen)
Häuten des Schädels	Häuten des Schädels
Entfernung der Augen mit Pinzette	Entfernung der Augen mit Pinzette
	Entnahme des Kaumuskels (M. masseter)
Trennen von Schädel und Mandibel	Trennen von Schädel und Mandibel
Ausschaben und Abpipetieren des Gehirns	Ausschaben und Abpipetieren des Gehirns
Ausspülen des Schädels mit H ₂ O _{deion}	Ausspülen des Schädels mit H ₂ O _{deion}
Sämtliche entnommenen Proben sofort nach Entnahme auf Eis	Sämtliche entnommenen Proben sofort nach Entnahme auf Eis
Entsorgung der Reste im Kadaverraum der Tierverswertung (LMU)	Entsorgung der Reste im Kadaverraum der Tierverswertung (LMU)

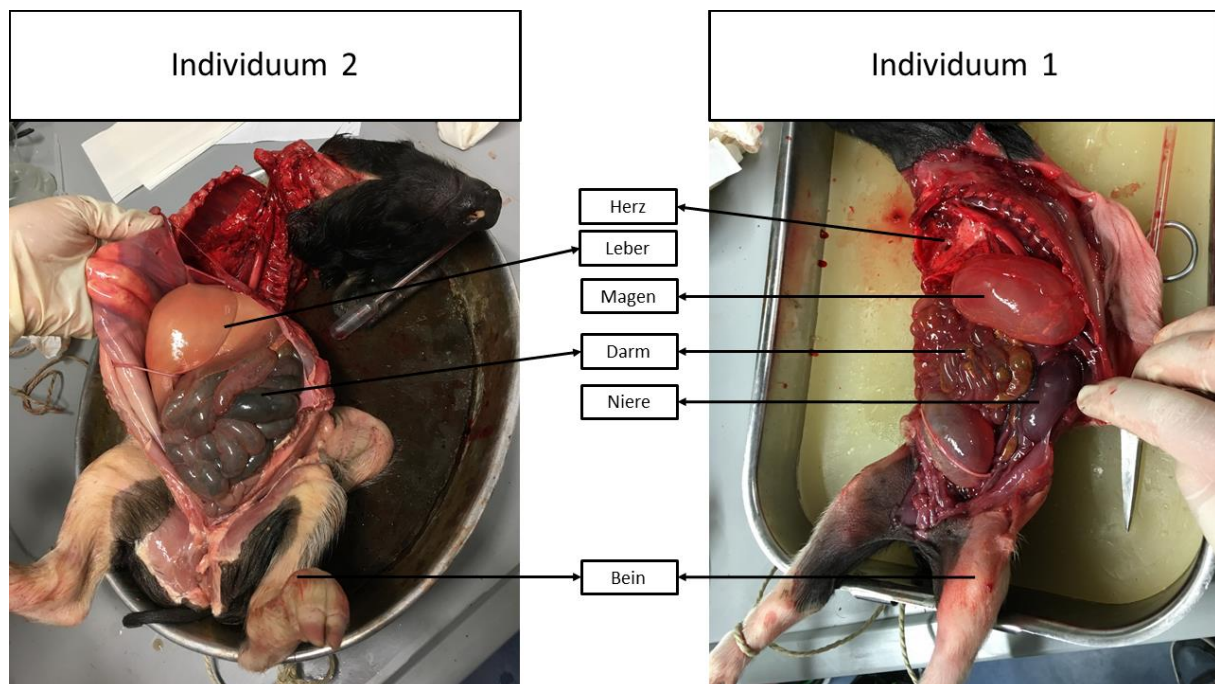


Abbildung 14 Sektion von Ferkel 1 (rechts; wenige Tage nach Geburt verstorben) und Ferkel 2 (links; ca. 3 Wochen nach Geburt verstorben). Beschriftet sind sichtbare innere Organe, sowie diejenigen Beine, von denen Femur und Laufmuskel beprobt wurden.

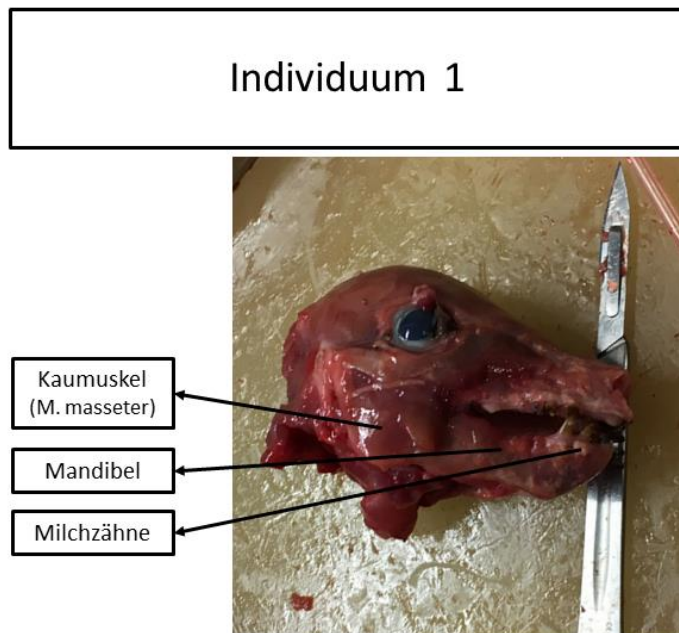


Abbildung 15 Gehäuteter Kopf von Ferkel 1. Eingezeichnet sind Milchzähne, Kaumuskel und Mandibel.

Die gekühlten Blutproben für die Sauerstoffanalysen wurden je zu einem Teil für 15 Minuten bei 4°C und 4020 rpm (ca. 2000-3000 g) abzentrifugiert, um eine Trennung von Plasma und Blutzellen zu erreichen, und der andere Teil unbehandelt gelassen, um das Vollblut testen zu können. Anschließend wurden die Blutproben wieder gekühlt bis zur weiteren Verarbeitung. Das Blut für die Strontiumanalysen, welches nicht mit EDTA behandelt worden war, wurde eingefroren.

B. Bearbeitung der einzelnen Probentypen

1. Bearbeitung von Knochen und Zähnen für weitere Analysen

Von den mineralisierten Hartgeweben sollte lediglich das Biomineral des Knochens bzw. Zahnschmelzes auf ihre isotopische Zusammensetzung ($\delta^{18}\text{O}$ und $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) und Konzentration an Sr (und Ca) hin untersucht werden. Dazu war es nötig vor der Messung alle organischen Bestandteile zu entfernen und nur den reinen Bioapatit zu isolieren.

Die zuvor herauspräparierten und mechanisch soweit wie möglich entfleischten Skelettelemente wurden zunächst mazeriert und anschließend entfettet. Die Mazeration wurde in den Laboren des Institutes für Paläoanatomie, Domestikationsforschung und Geschichte der Tiermedizin der Ludwig-Maximilians-Universität München unter Anleitung von Herrn Dr. Ferdinand Neuberger durchgeführt, der die hierfür nötigen Geräte und Reagenzien zur Verfügung stellte. Die Mazeration basiert auf dem künstlichen Verdau von Protein- und Fettanteilen durch eine bestimmte, dafür vorgesehene Enzymlösung. Diese enthält, in deionisiertem Wasser gelöst, die Wasch- und Lösungsmittel Supralan 67 und Supralan UF (jeweils 25 ml), sowie die Protease Subtilisin („Enzym OSA“) (50 ml). Hierbei wirken Supralan 67 und Supralan UF in erster Linie fettlösend und Enzym OSA löst das Protein.

Um Fleisch und Fett bestmöglich vom Knochen und den Zahnwurzeln zu entfernen, wurden die Skelettelemente in diesen Lösungsmitteln für fünf Tage bei 58-60° C eingelegt. In diesem Temperaturbereich arbeitet das Enzym in der Lösung optimal. Die einzelnen Teile wurden vor der Zugabe der Lösungsmitteln Gazebeutel separat verpackt, um evtl. während des Prozesses abfallende, bzw. zerfallende Elemente zusammenzuhalten. Während der fünf Inkubationstage wurde regelmäßig der Fortschritt der Mazeration überprüft und vorsichtig umgerührt, um den Reagenzien Zugang zu allen Teilen zu ermöglichen. Zum Schluss wurde die Temperatur auf 70° C erhöht, um die Reaktion zu beenden und das Enzym abzutöten. Daraufhin wurden die Knochen und Zähne getrocknet.

Abbildung 16 zeigt jeweils einen Schweineschädel vor und nach der Mazeration. Da bei diesem Vorgang vorwiegend das Protein entfernt wird und die fettigen Bestandteile nur grob gelöst werden, reichte die Mazeration alleine noch nicht aus, um die Proben für die Isotopenanalysen und Konzentrationsmessungen vorzubereiten.

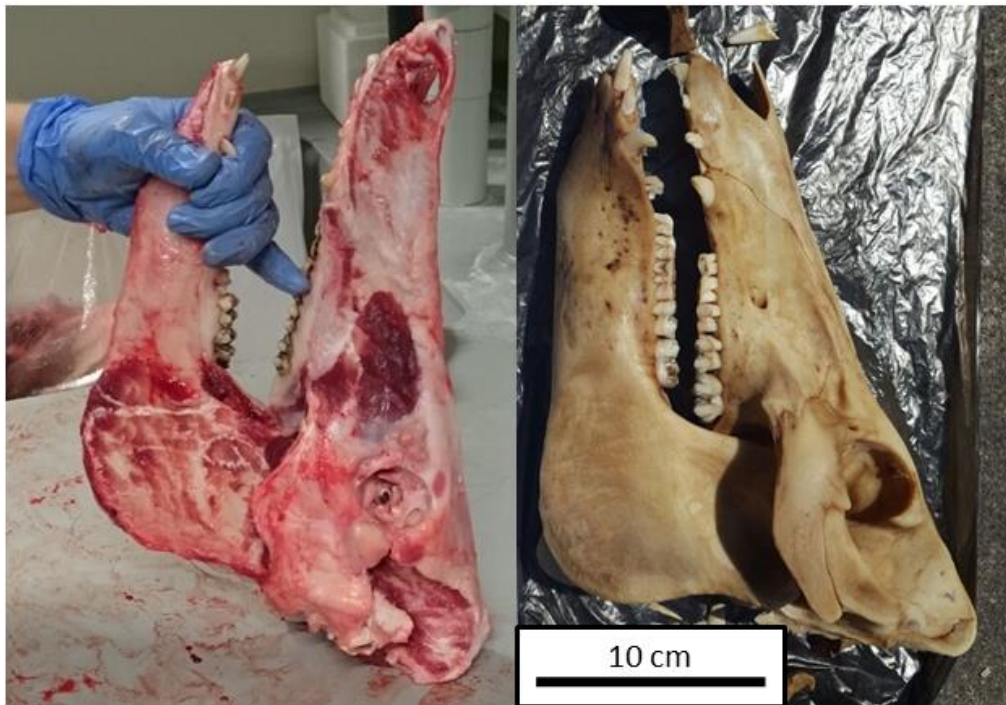


Abbildung 16 Schweineschädel (adult) vor und nach der Mazeration.

Deshalb wurde anschließend das restliche Fett durch eine Soxhlet-Apparatur aus den Proben gelöst. Dazu wurden zunächst mit einem Proxxon-Handscheifgerät Proben aus dem jeweiligen Knochen gesägt (ca. 2 x 4 cm) und die Zähne im Ganzen aus dem Kiefer befreit. Die Proben wurden mit Bindfaden markiert und in den zuvor vorbereiteten Soxhlet-Apparat gefüllt. Das Soxhlet-Verfahren dient dem kontinuierlichen Extrahieren löslicher Komponenten aus Feststoffen. Ein entsprechendes Lösemittel wird im Kolben erhitzt und in den Gaszustand gebracht, wodurch es in den Zylinder mit den Feststoffen gelangt und dort per Kühlung durch einen Rückflusskühler kondensiert. Dort löst es die zu entfernenden Komponenten aus der Probe und gelangt, nach Überschreiten eines bestimmten Pegels durch die entstehende Saughebewirkung über ein Kapillarrohr, mitsamt dieser zurück in den Kolben, wo es erneut erhitzt wird. Dieser Zyklus wird so lange fortgeführt, bis alle zu lösenden Stoffe entfernt wurden.

Diese Extraktionsmethode wurde ursprünglich zur Bestimmung des Fettgehaltes von Milch entwickelt (Soxhlet 1879). Auch hier wurde ein fettlösendes Verfahren angewandt, als Lösungsmittel diente Diethylether. Der Kolben mit dem Diethylether wurde über einen Heizpilz erhitzt und so zum Sieden gebracht. Zusätzlich zum Diethylether wurde Watte in den Auffangkolben gegeben, um damit das gelöste Fett aufzusaugen, was eine Sättigung des Lösungsmittels verzögerte. Nach fünf Tagen im Soxhlet-Apparat wurden die Proben bei Raumtemperatur im Abzug getrocknet. Die Oberfläche und die Spongiosa der Knochenproben wurden vorsichtig mit einem Diamantschleifer abgeschliffen.

Die bisher beschriebenen Methoden eignen sich sowohl für die Strontium-, als auch die Sauerstoffanalysen, da im Knochen und Zahnschmelz lediglich das gegenüber äußeren Einflüssen hoch stabile Knochenphosphat des Bioapatits untersucht wurde, das sowohl der Mazeration, als auch dem Diethylether standhält, weswegen beide Verfahren standardmäßig für beide Analysen verwendet



Abbildung 17 Zahnkronen der untersuchten Dauermolare (M1 und M3). Die Krone von M3 war zum Schlachtzeitpunkt noch nicht vollständig mineralisiert, wie an der Oberflächenstruktur zu erkennen ist.

werden. Eine Kontamination oder relevante Veränderung der Proben durch die Methoden und Reagenzien kann somit ausgeschlossen werden. Dasselbe gilt für das anschließende Anätzen mit konzentrierter Ameisensäure (HCOOH , 98%), das mögliche Verunreinigungen, beispielsweise durch Blutbestandteile o.ä. von der Oberfläche und aus den Poren entfernen sollte und außerdem zum standardmäßigen Verfahren im Versuchslabor gehört. Auch aus diesem Grund wurde angeätzt, weil das etablierte Protokoll nicht abgeändert werden sollte.

Die Proben wurden in Bechergläser gegeben und mit HCOOH bedeckt. Dann wurden sie für fünf Minuten ins Ultraschallbad gegeben. Im Anschluss wurde mindestens dreimal mit deionisiertem Wasser im Ultraschallbad gewaschen, um die Säure zu neutralisieren. Die Behandlung mit

Ameisensäure löste tatsächlich im Knochen und Dentin verbliebene Blutreste, was durch eine Entfärbung der Proben und eine Rotbraunfärbung der Säure zu erkennen war. Nach erneutem Trocknen wurde mittels eines Edelstahlmörser und zwei Edelstahlpinzetten noch der Zahnschmelz von Dentin getrennt, da nur dieser für die Messungen verwendet werden sollte. **Abbildung 17** zeigt zwei Zahnkronen der untersuchten Dauermolaren M1 und M3 vor der Abtrennung des Zahnschmelzes. Der Zahnschmelz von M3 war zum Zeitpunkt der Schlachtungen noch nicht vollständig mineralisiert, wie im Bild zu erkennen.

Nun waren die Proben bereit für die spezifischen Extraktionsmethoden, die zur Isotopenmessung und Konzentrationsanalyse nötig sind. Die Methoden für die Bestimmung der Strontiumisotopenverhältnisse, die der Sauerstoffisotopenverhältnisse und die der Strontiumkonzentrationen von Knochen bzw. Zahnschmelz unterscheiden sich, weshalb eine ausreichende Menge jeder Probe für die entsprechende Extraktionsmethode zugeteilt wurde.

2. Extraktion des Strontiums aus tierischen mineralisierten Hartgeweben (Knochen, Zahnschmelz)

Nachdem die Proben wie zuvor beschrieben entfleischt, entfettet und durch Anätzen von anhaftenden Blutresten befreit worden waren, wurde pro Probenotyp jeweils ein Teil des entsprechenden Zahnschmelzes bzw. Knochenstückes für die Strontium- und ein zweiter für die Sauerstoffextraktion portioniert. Mit den Proben für die Strontiumisotopenmessungen wurde wie folgt verfahren:

Zunächst wurden in einem Muffelofen durch Trockenveraschung in Porzellantiegeln die organischen Bestandteile aus den Proben entfernt, welche im Gegensatz zur Anorganik bei hohen Temperaturen flüchtig sind. Zahnschmelz und Knochen wurde dabei getrennt voneinander bei unterschiedlichen Temperaturen behandelt. Die Knochenproben wurden für zwölf Stunden bei 800°C verascht. Beim Zahnschmelz genügt hier eine Veraschung bei 500°C, ebenfalls für zwölf Stunden, da er aufgrund seines extrem hohen Mineralisationsgrades nur wenig Organik enthält. Eine gemeinsame Veraschung bei 800°C wurde nicht durchgeführt, weil Zahnschmelz bei hohen Temperaturen dazu neigt zu zerspringen und deshalb die Zahnproben mit einer Alufolieabdeckung, in welche mit einer Präpariernadel Löcher gestantzt wurden, vor dem Herausspringen von Zahnschmelzfragmenten geschützt werden mussten. Da Alufolie jedoch bei 800°C bereits schmilzt, konnte der Zahnschmelz nicht bei dieser Temperatur verascht werden.

Nach dem Veraschen wurden die Proben in einer Kugelschwingmühle (90 Sekunden, 25Hz) fein gemahlen und homogenisiert. Dies diente zum einen der besseren Handhabung bei der folgenden Einwaage und zum anderen der Durchmischung und somit Mittelung der in der Probe enthaltenen Strontiumisotopenverhältnisse.

Anschließend wurden 15-20 mg des Knochen- bzw. Zahnschmelzpulvers für die weiteren Schritte mit einer Feinwaage in Teflonwürfel eingewogen. Der Ablauf der Vorbereitung von Knochen- und Zahnschmelzproben zur Säulentrennung ist in **Tabelle 6** zusammengefasst.

Tabelle 6 Protokoll für die Vorbereitung der Zahn- und Knochenproben für die Säulentrennung.

Einwaage in Teflonwürfel	15-30 mg	
Probenaufschluss mit Salpetersäure	1 mL konzentrierte HNO ₃ (69%, supra), mit fest verschlossenem Deckel bei 100-120 °C, für ca. 24 Stunden	Durch Säure-, Hitze- und Druckeinwirkung werden Ionenbindungen gebrochen
Abrauchen der Säure	Im säureresistenten Abzug, mit geöffnetem Deckel, bei 120 °C, über Nacht	
Aufnahme der Probe in Salpetersäure	1 mL 8N HNO ₃ (ultra)	Probe nun bereit für die Säulentrennung

Beim Probenaufschluss mit Salpetersäure werden die einzelnen, im Kristallgitter gebundenen Ionen getrennt und in Lösung gebracht. Daraufhin wird die Säure durch Abrauchen entfernt und die Probe in 8N Salpetersäure aufgenommen, welche ein Milieu schafft, in dem Strontiumionen später optimal an das in der Säulentrennung verwendete Kunstharz binden.

Bei jeder Probencharge wurde ab dem Probenaufschluss ein Strontiumstandard (NBS NIST 1400; „Bone ash“) mitgeführt. Es handelt sich dabei um homogenisierte Knochenasche vom National Institute of Standards and Technology mit bekannter, festgelegter Strontiumkonzentration. Obwohl vom Hersteller kein Wert für das Strontiumisotopenverhältnis angegeben wird, haben langjährige laborinterne Messungen gezeigt, dass auch dieses je Charge als konstant betrachtet und somit NBS NIST 1400 auch als Standard für das Stabilisotopenverhältnis von Strontium verwendet werden kann.

Nachdem die Proben aufgeschlossen waren, folgte die Säulentrennung, bei der das Strontium, in möglichst reiner Form aus den Proben isoliert werden sollte. Hierbei werden, mithilfe eines speziellen

Kunstharzes, die Strontiumionen zunächst in der Säule gebunden, während andere Ionen, welche ansonsten später die Messung am Massenspektrometer stören könnten, stufenweise ausgewaschen werden. Als besondere Störfaktoren zu nennen sind hier diejenigen Ionen, die Strontium in Masse und/oder Ladung ähneln. Dazu gehören Calcium (Ca), Barium (Ba), Eisen (Fe), Blei (Pb) und vor allem Rubidium (Rb). Die Säulentrennung zur Extraktion von Strontium wurde nach Pin et al. (2003), modifiziert nach Vohberger (2011) und Klaut (in prep.) durchgeführt.

Dazu wurden Teflonsäulchen verwendet, die zuvor aus einem Schrumpfschlauch und speziellen Filtern (HDPE, 35µm) hergestellt worden waren. Hierbei diente der Filter in erster Linie dazu, das anschließend hinzugefügte Kunstharz in der Fritte zu halten, die ausgewaschenen Substanzen jedoch hindurchzulassen. Die schrittweise Eluierung der Proben basiert auf entsprechenden Veränderungen des pH-Wertes. ^{87}Sr und ^{87}Rb sind verschiedene Elemente derselben Masse, sogenannte Isobare. Wegen ihrer Ähnlichkeit kann bei der Messung der Isotopenverhältnisse von Strontium, verbliebenes Rubidium in den Proben dazu führen, dass die Messergebnisse verfälscht und unbrauchbar werden. Das für die Säulentrennung verwendete Kunstharz (Sr-Spec resin) zeichnet sich jedoch dadurch aus, dass unter geeigneten Bedingungen Strontiumionen an das Harz binden, Rubidiumionen jedoch nicht.

Tabelle 7 fasst das Procedere zur Isolation des reinen Strontiums aus der Probe und die schrittweise Auswaschung anderer Elemente zusammen. Generell war zu Beginn die Lauffähigkeit der Säulchen zu überprüfen, die beispielsweise durch Luftbläschen beeinträchtigt werden kann.

Tabelle 7 Protokoll für die Säulentrennung zur Strontiumextraktion.

Säubern der Säulchen mit Wasser	Spülen mit H ₂ O (bidest.)	Entfernen von anhaftenden Verunreinigungen
Befüllung mit Säulenmaterial	0,8-1 mL Sr-spec resin (in H ₂ O (bidest.) aufgenommen)	Kunstharz „Sr-spec resin“ zur schrittweisen Eluierung der Mineralien
Lösen der in Salpetersäure aufgenommenen Proben	Mit fest verschlossenem Deckel, bei 100 °C, für 20 Minuten	Ionen gehen vollständig in Lösung
Spülen der Säulchen	0,8-1 mL 8N HNO ₃ (ultra)	Auswaschen von möglicherweise in den Säulchen vorhandenem Rubidium und anderen (vor allem zweiwertigen) Spurenelementen
	0,8-1 mL 6N HCl (supra)	Auswaschen von möglichen Bleiverunreinigungen
	0,8-1 mL H ₂ O (bidest.)	Auswaschen von probenfremdem Strontium
Konditionierung der Säulchen	100 µL 8N HNO ₃ (ultra)	Herstellen des richtigen Milieus für die folgende Säulentrennung: Strontiumionen werden gebunden, Rubidiumionen jedoch nicht
Auftragen der Probe	300 µL Probe (in 8N HNO ₃ (ultra) gelöst)	
Auswaschen von Rubidium	100 µL 8N HNO ₃ (ultra) 200 µL 8N HNO ₃ (ultra) 600 µL 8N HNO ₃ (ultra) 200 µL 8N HNO ₃ (ultra)	Strontium bindet weiterhin an das Säulenmaterial, Rubidium wird schrittweise ausgewaschen
Herauslösen von Strontium und Auffangen in neuem Teflonwürfel	1 mL 0,05N HNO ₃ (ultra)	Strontium wird im veränderten Milieu (fast neutraler pH) vom Säulenmaterial gelöst
Abrauchen der Flüssigkeit	Im säureresistenten Abzug, mit geöffnetem Deckel, bei 100 °C, über Nacht	Reines Strontium verbleibt im Teflonwürfel und ist bereit für die Massenspektrometrie

3. Extraktion des Strontiums aus tierischen Weichgeweben (Fleisch, Organe, Blut)

Für die Aufbereitung der organischen Weichgewebeproben für die Strontiumisotopenanalyse stand noch keine im Labor etablierte Methode zur Verfügung. Es wurden deshalb zunächst zwei mögliche Methoden getestet und miteinander verglichen. Zum einen wurde eine Trockenveraschung durchgeführt, wie sie in ähnlicher Form bereits von Franke et al. (2008) angewendet wurde. Als zweite Methode wurde eine Nassveraschung getestet, basierend auf Baroni et al. (2011), welche von den Autoren jedoch bisher nur für die Konzentrationsbestimmung von Spurenelementen angewandt wurde.

Für beide Methoden wurde zunächst ein ausreichend großes Stück Probe entnommen (ca. 30-40 g) und gefriergetrocknet. Der Wasserverlust aus jeder Probe wurde festgehalten und der jeweilige Wasseranteil der Proben rückgerechnet. Anschließend wurde jede Probe mit einer Batch-Mühle homogenisiert. Daraufhin wurden jeweils fünf Gramm Trockenmasse für die entsprechende Methode abgewogen.

Die Trockenveraschung erfolgte im Muffelofen. Die Proben wurden in neuen, zuvor mit Salpetersäure gereinigten Porzellantiegeln mit Alufolieabdeckung, in die kleine Löcher gestanzt waren, verascht. Hierbei wurde die Temperatur stufenweise auf 650°C erhöht und für 12 Stunden gehalten. Die resultierende Asche wurde gewogen und komplett in Teflonwürfel überführt. Es folgte ein Aufschluss mit konzentrierter Salpetersäure. Danach wurden die Aufschlüsse mit doppelt destilliertem Wasser verdünnt und filtriert (PTFE, 0,45µm). Nachdem die Filtrate abgeraucht worden waren, wurden sie in 8N Salpetersäure (ultra) aufgenommen und waren bereit für die Säulentrennung. Das exakte Versuchsprotokoll ist **Tabelle 8** zu entnehmen. Die Säulentrennung erfolgte nach dem in **Tabelle 7** beschriebenen Schema, jedoch wurde hier die gesamte Probe aufgetragen.

Tabelle 8 Protokoll für die Extraktionsmethode von Strontium aus tierischem Weichgewebe mittels Trockenveraschung.

Einwaage Frischgewicht	Ca. 20 g	
Lyophilisieren	Abdecken der Schnappdeckelgläser mit Alufolie, Gefriertrocknung im Lyophilisator, bei -50 °C, für mind. 1 Woche	Trocknung der Proben
Homogenisieren	Mit IKA-Batch-Mühle ca. 30 Sekunden bei 8500-9000 rpm mahlen	Zerkleinern und homogenisieren der Proben für die weitere Verarbeitung
Einwaage in Porzellantiegel	5 g	
Veraschen im Muffelofen	Stufenweise erhitzen bis 650 °C (100 °C pro Stunde) für 12 Stunden, mit Alufolieabdeckung	Entfernung organischer Bestandteile aus der Trockenmasse
Ausbeute bestimmen	Wiegen der Asche mittels Feinwaage, überführen in Teflonwürfel	Menge an erhaltener Asche für den Probenaufschluss bestimmen
Probenaufschluss mit Salpetersäure	2mL konzentrierte HNO ₃ (69%, supra), mit fest verschlossenem Deckel bei 100-120 °C, für ca. 24 Stunden	Durch Säure-, Hitze- und Druckeinwirkung werden Ionenbindungen und Molekülverbände gebrochen
Filtrieren der Aufschlüsse	2 mL Aufschluss + 2 mL H ₂ O (bidest.) durch PTFE-Filter (0,45 µm) filtriert	Entfernung organischer und großmolekularer Restbestandteile
Eindampfen der Filtrate	Im säureresistenten Abzug, mit geöffnetem Deckel, bei 120 °C, über Nacht	
Aufnahme der Probe in Salpetersäure	1 mL 8N HNO ₃ (ultra)	Probe nun bereit für die Säulentrennung

Die Nassveraschung wurde (ebenso wie die Homogenisierung) in Kooperation mit dem Chemie- und Umweltanalytiklabor der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf durchgeführt. Sie folgte dem von Baroni et al. (2011) beschriebenen Procedere für den Aufschluss für Elementaranalysen. In einem Mikrowellenofen (MLS Ethos) wurden die Proben mit einem Gemisch aus konzentrierter Salpetersäure und Wasserstoffperoxid kontrolliert mineralisiert. Die Aufschlüsse wurden daraufhin mit wenig Reinstwasser direkt in Sarstedt- Gefäße überführt und anschließend filtriert (PTFE, 0,45 µm). Nach anschließendem Eindampfen konnten die Proben in 8N Salpetersäure aufgenommen werden und waren bereit für die Säulentrennung.

Auch hier wurde die gesamte Probe auf die Säulchen aufgetragen, sodass die Menge an Strontium dem Äquivalent von in fünf Gramm Probe enthaltenem Strontium entsprach. **Tabelle 9** stellt den Ablauf der Extraktionsmethode dar, die genauen Programmdetails sind bei Baroni et al. (2011) nachzulesen.

Tabelle 9 Protokoll für die Extraktionsmethode von Strontium aus tierischem Weichgewebe mittels Nassveraschung nach Baroni et al. (2011).

Einwaage Frischgewicht	Ca. 20 g	
Lyophilisieren	Abdecken der Schnappdeckelgläser mit Alufolie, Gefriertrocknung im Lyophilisator, bei -50 °C, für mind. 1 Woche	Trocknung der Proben
Homogenisieren	Mit IKA-Batch-Mühle ca. 30 Sekunden bei 8500-9000 rpm mahlen (ca. 5 g Trockenmasse)	Zerkleinern und homogenisieren der Proben für die weitere Verarbeitung
Einwaage in MPV-100 Behälter	0,5 g	
Aufschluss im Mikrowellenofen (MLS Ethos)	5 mL HNO ₃ (konz., ultra) + 1 mL H ₂ O ₂ (konz., reinst)	Kompletter Aufschluss der Probe
Eindampfen und Aufnahme in Reinstwasser	Trocknung der Proben und anschließende Aufnahme in ca. 10 mL H ₂ O (bidest.)	Proben bereit zum Verschicken und Filtrieren
Filtrieren der Aufschlüsse	Aufschluss durch PTFE-Filter (0,45 µm) filtriert	Entfernung möglicher organischer und großmolekularer Restbestandteile
Eindampfen der Filtrate	Im säureresistenten Abzug, mit geöffnetem Deckel, bei 120 °C, über Nacht	
Aufnahme der Probe in Salpetersäure	1 mL 8N HNO ₃ (ultra)	Probe nun bereit für die Säulentrennung

Die Nassveraschung erwies sich als die einzige verlässliche Methode zum Aufschluss der tierischen Weichgewebeproben. Nur hier konnte sichergestellt werden, dass ausreichend viel Strontium kontaminationsfrei aus den Proben gewonnen wurde, um eine ausreichend präzise Messung am Massenspektrometer zu ermöglichen. Die Trockenveraschung wurde, nachdem dies klar war, eingestellt und die Methode nach Baroni et al. (2011) folglich weiter verfolgt und für die Auswertung verwendet.

4. Extraktion des Strontiums aus Schweineborsten

Zunächst wurden die Haarproben mit doppelt destilliertem Wasser grob gespült und gewaschen, um grobe Verunreinigungen, wie etwa Erde, Blut und Kot zu entfernen. Daraufhin wurden die Proben im Ultraschallbad gereinigt, ebenfalls mit doppelt destilliertem Wasser. Um extern an bzw. in das Haar eingelagertes Strontium zu entfernen wurde die Methode von Tipple et al. (2013) angewandt, die sich laut deren Studie am besten für diesen Zweck eignet. Hierbei erfolgt eine Reinigung im Ultraschallbad mit 0.1M HCl. Die Reinigungsschritte der Haar- bzw. Borstenproben sind in **Tabelle 10** festgehalten.

Tabelle 10 Protokoll für die Reinigung der Haar- bzw. Borstenproben.

Grobes Waschen mit Wasser	Spülen mit H ₂ O (bidest.) bis keine Färbung des Wassers mehr auftritt, entfernen großer Fremdpartikel (z.B. Stroh, Blutklumpen etc.) mit Pinzette	Entfernen von anhaftenden Verunreinigungen (Erde, Blut, Kot etc.)
Waschen mit Wasser im Ultraschallbad	3 x 15 Minuten mit H ₂ O (bidest.) im Ultraschallbad (jeweils ca. 20mL)	Entfernen mikroskopischer Verunreinigungen von der Oberfläche
Waschen mit schwacher Salzsäure	3 x 10 Minuten mit 0.1M HCl im Ultraschallbad (jeweils ca. 20 mL)	Entfernen des extern angelagerten Strontiums
Lyophilisieren	Abdecken der Schnappdeckelgläser mit Alufolie, Gefriertrocknung im Lyophilisator, bei -50 °C, für mind. 4 Tage	Trocknung der Proben
Zerkleinern der Proben	Mit sauberer Schere kleinstmöglich schneiden, dann mit flüssigem Stickstoff in Porzellanmörser homogenisieren	Zerkleinern, Homogenisieren

Um eine möglichst einfache und valide Methode zur Strontiumextraktion aus keratinhaltigem Material zu finden, wurden im Vorfeld testweise drei verschiedene Aufschlussprozeduren miteinander verglichen. Dazu wurden menschliche Haare einer Kollegin verwendet, welche zunächst, wie oben beschrieben, gewaschen und anschließend homogenisiert wurden.

Die drei zu vergleichenden Extraktionsmethoden sind in **Tabelle 11** beschrieben. Es handelte sich dabei um eine Trockenveraschung im Muffelofen, entsprechend der Methode zur Zahnschmelzbehandlung, einen Aufschluss mit Salzsäure und Salpetersäure, ähnlich dem der Bodenproben und einen Aufschluss mit Königswasser, Salpetersäure und Wasserstoffperoxid nach Font et al. (2007) bzw. Font et al. (2012).

Bei dieser Vorstudie ergaben sich keine relevanten qualitativen Unterschiede zwischen den drei Methoden. Alle drei funktionierten und lieferten vergleichbare Ergebnisse. Zusätzlich wurde auch ein Knochenstandard (NIST 1400 „K“) entsprechend der Methode von Font et. al. (2012) mitgeführt. Da offenbar alle Methoden zu ähnlich guten Ergebnissen führten, wurden die Borstenproben der Testschweine im Folgenden nach derjenigen Methode bearbeitet, welche am einfachsten und ungefährlichsten durchzuführen war und zudem die Gefahr von Probenverlust und Kontamination im Muffelofen ausschloss: dem Aufschluss mit Salzsäure und Salpetersäure.

Tabelle 11 Vergleich der drei Extraktionsmethoden von Strontium aus keratinhaltigem Material.

Trockenveraschung

Einwaage in Porzellantiegel	80 mg
Veraschen im Muffelofen	5 Stunden bei 500 °C, mit Alufolie abgedeckt
Auswaage der Asche	Asche mit Feinwaage wiegen, in Teflonwürfel überführen
Probenaufschluss mit Salpetersäure	1,5 mL konzentrierte HNO ₃ (69%, supra), mit fest verschlossenem Deckel bei 100-120 °C, für ca. 24 Stunden
Abrauchen der Säure	Im säureresistenten Abzug, mit geöffnetem Deckel, bei 120 °C, über Nacht
Aufnahme der Probe in Salpetersäure	1 mL 8N HNO ₃ (ultra), Probe nun bereit für Säulentrennung

Aufschluss mit HCl und HNO₃

Einwaage in Teflonbecher	80 mg
Probenaufschluss mit Salzsäure	1,5 mL HCl (35%, supra), mit fest verschlossenem Deckel bei 100-120 °C, über Nacht
Abrauchen der Säure	Im säureresistenten Abzug, mit geöffnetem Deckel, bei 120 °C, über Nacht
Probenaufschluss mit Salpetersäure	1,5 mL konzentrierte HNO ₃ (69%, supra), mit fest verschlossenem Deckel bei 100-120 °C, für ca. 24 Stunden

Aufschluss mit Königswasser, HNO₃ und H₂O₂ (Font et al. 2012)	Abrauchen der Säure	Im säureresistenten Abzug, mit geöffnetem Deckel, bei 120 °C, über Nacht
	Aufnahme der Probe in Salpetersäure	1 mL 8N HNO ₃ (ultra), Probe nun bereit für Säulentrennung
	Einwaage in Teflonbecher	80 mg (NIST 1400 „K“: 15 mg)
	Probenaufschluss mit Königswasser	1,5 mL 14M HNO ₃ (supra) + 0,5 mL 8M HCl (supra), nach 10 Minuten offener Reaktion (exotherm) mit fest verschlossenem Deckel bei 100- 120 °C, für ca. 24 Stunden
	Abrauchen der Säure	Im säureresistenten Abzug, mit geöffnetem Deckel, bei 120 °C, über Nacht
	Probenaufschluss mit Salpetersäure und Wasserstoffperoxid	100 µL HNO ₃ (69%, supra) + 100 µL H ₂ O ₂ (30%, reinst), nach 10 Minuten offener Reaktion mit fest verschlossenem Deckel bei 100-110 °C, für ca. 15 Minuten
	Abrauchen	Im säureresistenten Abzug, mit geöffnetem Deckel, bei 120 °C, über Nacht
	Aufnahme der Probe in Salpetersäure	1 mL 8N HNO ₃ (ultra), Probe nun bereit für Säulentrennung

Die Säulentrennung wurde nach dem in **Tabelle 7** beschriebenen Protokoll durchgeführt, mit der Ausnahme, dass 400 µL statt 300 µL in 8N Salpetersäure aufgenommene Probe aufgetragen wurden. Um zu testen, ob der Erfolg der Messungen dadurch beeinflusst würde, wurde in der Testreihe mit menschlichem Haar jeweils eine Probe jeden Aufschlusstyps einer doppelten Säulentrennung unterzogen, was bedeutet, dass das nach der ersten Trennung erhaltene, abgerauchte Material erneut in 8N Salpetersäure aufgenommen und eine zweite Säulentrennung durchgeführt wurde. Hier wurde die gesamte Probe auf das Säulchen aufgetragen, um die Menge an enthaltenem Strontium nicht weiter zu verringern.

Es zeigte sich in diesen Vorversuchen jedoch, dass dieser zusätzliche Schritt unnötig für die Qualität der Messergebnisse war (identische Messergebnisse und Präzision am Massenspektrometer), weswegen alle Proben der Testtiere nur einfach getrennt wurden.

5. Extraktion des Strontiums aus anorganischen Umweltproben (Boden, Wasser)

Auf ein Filtrieren wurde bei den Trinkwasserproben bewusst verzichtet, weil die Isotopenverhältnisse desjenigen Wassers bestimmt werden sollten, das die Tiere als Trinkwasser zu sich nahmen. Um etwaige Schwankungen dennoch detektieren zu können, wurde vom selben Wasser sowohl eine reine Quellwasserprobe, als auch eine Probe aus dem Wasserbecken untersucht. Obwohl im Wasser aus dem Becken mit mehr Verunreinigungen und Schwebstoffen zu rechnen ist, zeigten sich keine signifikanten Unterschiede in den Strontiumisotopenverhältnissen (s. Ergebnisteil). Die Wasserproben wurden zunächst eingedampft (jeweils 20 mL) und anschließend genauso, wie die Knochen- und Zahnschmelzproben aufgeschlossen und einer Säulentrennung unterzogen (s. **Tabelle 6** und **Tabelle 7**).

Die Vorbereitung der Bodenproben für die Säulentrennung wurde nach Vohberger (2011) durchgeführt. Dazu wurden die Proben zunächst gesiebt (0.125 mm, 0.5 µm) und von groben organischen Bestandteilen befreit. In **Tabelle 12** ist das Protokoll für die Aufbereitung der Bodenproben dargestellt.

Tabelle 12 Protokoll für die Vorbereitung der zuvor gesiebten Bodenproben für die Säulentrennung.

Einwaage in Teflonbecher	300 mg	
Probenaufschluss mit Salzsäure	2 mL HCl (35%, supra), mit fest verschlossenem Deckel bei 100-120 °C, über Nacht	Durch Säure-, Hitze- und Druckeinwirkung werden Mineralien aus der Erde gelöst
Abrauchen der Säure	Im säureresistenten Abzug, mit geöffnetem Deckel, bei 120 °C, über Nacht	
Probenaufschluss mit Salpetersäure	1 mL HNO ₃ (69%, supra), mit fest verschlossenem Deckel bei 100-120 °C, über Nacht	Durch Säure-, Hitze- und Druckeinwirkung werden Mineralien aus der Erde gelöst
Abzentrifugieren	Überführen von Probe und Säure in Eppendorfgefäß, Zentrifugieren bei 11000 rpm, für 10 Minuten	Im Überstand befinden sich herausgelöste Mineralien
Abrauchen der Säure	Im säureresistenten Abzug, mit geöffnetem Deckel, bei 120 °C, über Nacht	
Erneuter Aufschluss und Abrauchen (optional)	1 mL HNO ₃ (69%, supra), mit fest verschlossenem Deckel bei 100-120 °C, über Nacht Abrauchen im säureresistenten Abzug, mit geöffnetem Deckel, bei 120 °C, über Nacht	Nur, falls Probe nach dem Abrauchen noch immer zähflüssig und braun wirkt
Aufnahme der Probe in Salpetersäure	1 mL 8N HNO ₃ (ultra)	Probe nun bereit für die Säulentrennung

Der beschriebene, stufenweise Aufschluss der Erdproben soll eine beschleunigte Verwitterung und Herauslösung von Bestandteilen aus dem Boden simulieren, weswegen, wie oben beschrieben, auch nicht die Isotopien der Gesamtprobe gemessen werden, sondern nur die des im Überstand gelösten Materials. Diese Isotopensignatur soll der biologisch verfügbaren Isotopenzusammensetzung möglichst nahe kommen.

Nach dem Aufschluss wurden auch die Bodenproben in 1 mL 8N HNO₃ aufgenommen und eine Säulentrennung gemäß **Tabelle 7** durchgeführt.

6. Extraktion des Strontiums aus den Futterproben

Wie auch für die tierischen Weichgewebe, musste im Fall der Futterproben zunächst eine geeignete Methode für einen verlässlichen Aufschluss gefunden werden. Verglichen wurden einerseits eine Trockenveraschung, ähnlich der der Knochen- und Zahnschmelzproben und andererseits die auch bei den Fleisch- und Organproben getestete Nassveraschung. Für alle drei Methoden wurden jeweils ca. 20 g jeder Probe zunächst gefriergetrocknet und anschließend der entsprechende Wassergehalt berechnet und dokumentiert. Die Trockenveraschung wurde wie für die Knochen beschrieben durchgeführt, jedoch wurden hier zwei Temperaturen verglichen (500 °C und 800 °C). Die Proben (1-3 g Trockenmasse) wurden bei der jeweiligen Temperatur für fünf Stunden im Muffelofen verascht. Von der Asche wurde, je nach Proben typ, eine ausreichende Menge (60-200 mg) für den anschließenden Druckaufschluss in Teflongefäße abgewogen. Es folgte ein Druckaufschluss, wie er in Tabelle 13 beschrieben ist, ähnlich dem der Bodenproben.

Die Nassveraschung entsprach weitestgehend der für die tierischen Fleisch- und Organproben nach Baroni et al. (2011) (s. **Tabelle 9**) und wurde ebenso an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf durchgeführt.

Tabelle 13 Protokoll für die Vorbereitung der trockenveraschten Futterproben für die Säulentrennung.

Einwaage in Teflonbecher	50-200 mg (je nach Typ)	
Probenaufschluss mit Salpetersäure	1,5 mL HNO ₃ (69%, supra), mit fest verschlossenem Deckel bei 100-120 °C, über Nacht	Durch Säure-, Hitze- und Druckeinwirkung werden Mineralien aus der Probe gelöst
Abrauchen der Säure	Im säureresistenten Abzug, mit geöffnetem Deckel, bei 120 °C, über Nacht	
Probenaufschluss mit Salzsäure	1,5 mL HCl (35%, supra), mit fest verschlossenem Deckel bei 100-120 °C, über Nacht	Durch Säure-, Hitze- und Druckeinwirkung werden Mineralien aus der Probe gelöst
Abrauchen der Säure	Im säureresistenten Abzug, mit geöffnetem Deckel, bei 120 °C, über Nacht	
Probenaufschluss mit Salpetersäure	1 mL HNO ₃ (69%, supra), mit fest verschlossenem Deckel bei 100-120 °C, über Nacht	Durch Säure-, Hitze- und Druckeinwirkung werden Mineralien aus der Erde gelöst
Abrauchen der Säure	Im säureresistenten Abzug, mit geöffnetem Deckel, bei 120 °C, über Nacht	
Erneuter Aufschluss und Abrauchen (optional)	1 mL HNO ₃ (69%, supra), mit fest verschlossenem Deckel bei 100-120 °C, über Nacht Abrauchen im säureresistenten Abzug, mit geöffnetem Deckel, bei 120 °C, über Nacht	Nur, falls Probe nach dem Abrauchen noch immer zähflüssig und braun wirkt
Aufnahme der Probe in Salpetersäure	1 mL 8N HNO ₃ (ultra)	Probe nun bereit für die Säulentrennung

7. Konzentrationsbestimmung von Strontium

Von allen Probenotypen wurde eine Stichprobe jeden Materials gewählt, an welcher die jeweiligen Konzentrationen an Strontium gemessen wurden, deren Mittelwerte die gesamten Proben des jeweiligen Typs repräsentieren sollten. Die Konzentrationsmessungen und die dafür nötigen Aufschlüsse wurden komplett in den Laboren der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf als Dienstleistung durchgeführt. Für die Aufschlüsse der Feststoffproben wurde ein Mikrowellenverfahren mit Wasserstoffperoxid und Salpetersäure angewendet, nachdem die Proben gefriergetrocknet und mittels Batch-Mühle homogenisiert worden waren. Für die Trinkwasserproben waren diese Schritte nicht nötig. Bei den Bodenproben wurden nicht die gesamten Proben vermessen, sondern diejenigen Auszüge, die auch in der Isotopenanalytik den Anteil an bioverfügbarem Strontium repräsentieren sollen. Die eingedampften Auszüge wurden in Reinstwasser gelöst und die Konzentration entsprechend auf die ursprüngliche Einwaagemenge an Material zurückgerechnet.

Die Konzentrationsmessung selbst fand entweder durch eine Optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) oder eine Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) statt. Da das Verfahren mittels AAS eine geringere Bestimmungsgrenze ermöglicht, wurde diese Methode für diejenigen Proben angewandt, für die die ICP-OES keine verlässlichen Werte liefern konnte.

Mit dem ICP-OES-Verfahren können prinzipiell die Konzentrationen vieler Elemente einer (angesäuerten) Lösung gleichzeitig bestimmt werden. Nachdem die zu messende Substanz gelöst wurde, wird die Probenlösung über ein Zerstäubersystem in ein induktiv gekoppeltes Argonplasma eingebracht. Durch sehr hohe Temperaturen werden die in der Lösung enthaltenen Elemente ionisiert und zur Lichtemission angeregt. Die so entstehenden Photonen werden durch einen Polychromator in ihre für die jeweiligen Elemente spezifischen Wellenlängen aufgespalten und die entsprechenden Lichtintensitäten von sogenannten Photomultipliern gemessen. Da die Lichtintensitäten proportional zur Menge der im Plasma vorhandenen, angeregten Atome der Elemente sind, kann so der quantitative Gehalt jedes einzelnen Elements bestimmt werden. Hierfür wird mit synthetischen Eichlösungen kalibriert und stets Referenzlösungen als Vergleichsstandards zur Kontrolle mitgeführt.

Um die Gültigkeit und Stabilität der Kalibrierung stetig zu überprüfen, wurde nach jeweils fünf bis sieben Proben eine der Kalibrierungslösungen erneut gemessen. Hierbei wurden Abweichungen von $\pm 10\%$ toleriert. Die Richtigkeit der Kalibration wird durch Standardlösungen für die entsprechenden Elemente (Strontium, Calcium) überprüft, wobei auch hier Abweichungen von 10 % toleriert werden. In die Kalibrierung und als Referenz wird immer auch ein Blindwert bzw. Blindaufschluss miteinbezogen. Die Messwerte der Blindaufschlüsse werden dann von den Messwerten der eigentlichen Proben abgezogen und die Messwerte so korrigiert. Außerdem wurden für die jeweiligen Messungen Referenzmaterialien als Vergleich hinzugezogen, welche wie die Proben behandelt und gemessen wurden. Dazu gehören ein Standard für Knochenasche („Bone Ash“ NBS NIST 1400) und ein Standard für Heu (Reference Material IAEA-V-10 Hay des Analytical Quality Service der IAEA) mit definiertem Sr- bzw. Ca-Gehalt.

An allen Proben und Standards wurden Dreifachmessungen durchgeführt und relative Standardabweichungen von höchstens 1% erreicht. Um Verunreinigungen zu vermeiden wurden alle verwendeten Geräte (Kolben, Aufschlussgefäße,...) vor Gebrauch mit zweimolarer Salpetersäure vor- und anschließend mit Reinstwasser nachgespült. Die zuvor beschriebenen Maßnahmen zur Qualitätssicherung (Eich- und Referenzlösungen, Blindaufschlüsse, Referenzmaterialien, Reinigung etc.) wurden auch bei der AAS angewandt. Hierbei handelt es sich um ein spektralanalytisches Verfahren, bei dem der Gehalt bestimmter Elemente mit Hilfe der Absorption optischer Strahlung durch freie Atome im Gaszustand gemessen werden kann. Die Probe wird hierzu mit unterschiedlichen

Wellenlängen bestrahlt, welche mit einem Monochromator erzeugt werden. Dann wird mittels eines Photomultipliers ermittelt, welche dieser Wellenlängen von den darin enthaltenen Atomen absorbiert werden. Hiermit können auch sehr geringe Konzentrationen noch gut bestimmt werden.

8. Extraktion des Phosphates aus tierischen mineralisierten Hartgeweben
(Knochen, Zahnschmelz)

Die Sauerstoffisotopenverhältnisse wurden an der Phosphatgruppe des Knochen- bzw. Zahnschmelzminerals gemessen, da dies eine seit Jahren häufig angewandte Methode ist und viele Literaturangaben im Zusammenhang mit Migrations- oder Paläoklimastudien darauf beruhen. Die Messwerte dieser Proben sollten somit unter anderem als Ausgangsmaterial für die organischen Vergleichsproben dienen.

a) Deproteinierung

Um das Phosphat zu isolieren, mussten zunächst, wie auch für die Strontiumanalysen, alle organischen Komponenten (Kollagene, nicht kollagene Proteine etc.) entfernt und der reine Apatit isoliert werden. Im Gegensatz zu den Strontiummessungen kam eine temperaturbedingte Entfernung der Organik nicht infrage, da die Verhältnisse der Sauerstoffisotope im Phosphat bei hohen Temperaturen nicht stabil sind. Deshalb wurde für die Apatitextraktion hier wie folgt vorgegangen: Zunächst wurden die Proben in einer Kugelschwingmühle (1 min, 25 Hz) gemahlen und homogenisiert (1 min, 25 Hz). Dann wurde gemäß dem in **Tabelle 14** beschriebenen Protokoll, nach Lee-Thorp et al. (1989), weiter verfahren. Die Behandlung mit Natriumhypochlorid wurde so oft wiederholt, bis keine Bläschenbildung mehr in den Teflonröhrchen stattfand, mindestens jedoch, wie in **Tabelle 14** beschrieben, zweimal. Die beschriebene Behandlung mit Calcium-Acetat-Essigsäure-Puffer dient der Entfernung sekundär absorbierten Karbonates.

Tabelle 14 Protokoll zur Apatitextraktion aus Knochen und Zahnschmelz.

Einwaage in Teflonröhrchen	100 mg	
Behandlung mit Natriumhypochlorid	<p>5 mL NaOCl (4%), vortexen, dann mit leicht aufgeschraubtem Deckel (Gasbildung),</p> <p>für 2 Tage auf den Schüttler</p> <p>Abzentrifugieren</p> <p>(5 min, 5000 rpm)</p> <p>Absaugen des NaOCl mit Vakuumpumpe</p> <p>5 mL NaOCl (4%), vortexen, dann mit leicht aufgeschraubtem Deckel (Gasbildung),</p> <p>über Nacht auf den Schüttler</p> <p>Abzentrifugieren</p> <p>(5 min, 5000 rpm)</p> <p>Absaugen des NaOCl mit Vakuumpumpe</p>	Entfernung aller organischen Bestandteile aus dem Zahnschmelz bzw. Knochen, durch Oxidation
Spülen mit Wasser	<p>5-6 x auffüllen mit H₂O (deion.), vortexen, zentrifugieren, absaugen</p>	Neutralisieren der Proben, bis ein pH-Wert von 5-6 erreicht ist
Behandlung mit Calcium-Acetat-Essigsäure-Puffer	<p>5 mL 1M Calcium-Acetat-Essigsäure-Puffer, vortexen, dann mit gelockertem Deckel, 24 Stunden auf den Schüttler</p>	(normalerweise: Entfernung von sekundär absorbiertem Karbonat)
Spülen mit Wasser	<p>5-6 x auffüllen mit H₂O (deion.), vortexen, zentrifugieren, absaugen</p>	Neutralisieren der Proben, bis ein pH-Wert von 5-6 erreicht ist
Überführen der Proben in Schnappdeckelgläser	<p>Mit etwas H₂O (deion.) und dem Vortexer</p>	Möglichst alles Überführen, um Verluste und somit Verfälschung der Apatitausbeute zu vermeiden
Lyophilisieren	<p>Abdecken der Schnappdeckelgläser mit Alufolie, Gefriertrocknung im Lyophilisator, bei -50 °C,</p> <p>für mind. 4 Tage</p>	Trocknung der Proben

b) Silberphosphat-Fällung

Aus dem so gewonnenen Apatit musste nun das reine Phosphat gewonnen werden, um nur den darin enthaltenen Sauerstoff messen zu können. Dazu wurden die Anionen der Phosphatgruppe mithilfe von Silbernitrat nach O'Neil et al. (1994) und Lécuyer (2004), modifiziert nach Toncala (2017) ausgefällt. Die genaue Vorgehensweise ist **Tabelle 15** zu entnehmen.

Tabelle 15 Protokoll zur Silberphosphat-Fällung aus Apatit.

Einwaage in Safe-Lock Tube	3 mg (Apatit)	
Behandlung mit Flusssäure	115 µL 2M HF, 4-6 Stunden auf den Schüttler	Vollständiger Aufschluss des Apatits, Ausfällen von Ca^{2+} als CaF_2 (weißer Niederschlag), Entfernung von Huminsäuren
Neutralisieren mit Kalilauge	115 µL 2M KOH, kurz schütteln	Vollständige Neutralisierung aufgrund hoher Toxizität von HF besonders wichtig
Abzentrifugieren	Zentrifugieren bei 3000 rpm, für 15 Minuten, Überführen des Überstandes in neues (abgewogenes) Safe-Lock-Tube	Im Überstand befindet sich (u.a.) das Phosphat
Silberphosphatfällung mit Silbernitratlösung (bestehend aus Silbernitrat, Ammoniumnitrat und Ammoniaklösung)	1,5 mL Silbernitratlösung (frisch angesetzt, pH zu Beginn: 10-11), mit geöffnetem Deckel bei 60 °C über Nacht ins Wasserbad	Ag_3PO_4 -Kristalle fallen aus (gelb bis gelblich-schwarz). Silbernitratlösung muss kurz vor der Fällung frisch angesetzt werden, da diese auf der langsamen Verringerung des pH-Wertes beruht, die durch Verdampfen von Ammoniak erreicht wird.
Prüfen und Verwerfen des Überstandes	pH-Wert des Überstandes vor dem Verwerfen überprüfen, dann vorsichtig abpipettieren	pH-Wert wird überprüft, um sicher zu stellen, das Reaktion korrekt abgelaufen ist
Waschen der Silberphosphatkristalle	Auffüllen des Safe-Lock-Tubes mit H_2O (deion.), 3 Minuten im Ultraschallbad (35 kHz), Abpipettieren des Wassers	So oft wiederholen, bis alle Kristalle sich am Gefäßboden abgesetzt haben (mindestens fünfmal)
Trocknen der Proben	Möglichst viel Flüssigkeit Abpipettieren, dann offen bei 60 °C im Trockenschrank, für 3-4 Stunden	
Einwaage für Massenspektrometrie	0,93 mg ($\pm 0,01$ mg) in Silberkapsel, anschließend: Falten der Kapsel zu kleinem Würfel	Portionierung für die Anforderungen des Massenspektrometers, sicherer Verschluss der Kapseln

Es war wichtig, die für die Silberphosphatfällung verwendete Silbernitratlösung immer erst kurz vor der Fällung anzusetzen, da die Reaktion auf der langsamen Verringerung des pH-Wertes beruht, die durch Verdampfen von Ammoniak erreicht wird. Weil die Reaktion mit einem pH von etwa 10-11 starten muss, darf der Ammoniak erst kurz vor Beginn zur Silbernitratlösung gegeben werden. Das gewonnene Silberphosphat wurde, wie in **Tabelle 15** nachzulesen, getrocknet und in Silberkapseln eingewogen. Die so portionierten Proben wurden dann zur Massenspektrometrie geschickt. Bei der Silberphosphatfällung wurde zur Qualitätskontrolle stets der Standard NBS 120C mitgeführt und ebenfalls in Silberkapseln eingewogen. Bei der Apatitextraktion und Phosphatfällung wurde auch der Standard NBS NIST 1400 mitgeführt.

9. Sauerstoffisotopenverhältnisse von organischen Proben (Fleisch, Organe, Blut, Futter, Borsten)

Bei der Messung der Sauerstoffisotopenverhältnisse der organischen Proben wurden bei Materialien mit erwähnenswertem Wasseranteil, jeweils die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der festen Bestandteile (Trockenmasse) und die des enthaltenen Wassers (Gewebswasser) getrennt gemessen. Hierfür waren pro Probentyp jeweils zwei verschiedene Proben desselben Materials nötig.

Für die Messung der Verhältnisse der Isotopenverhältnisse der Trockenmasse, wurde eine geringe Menge Probe (ca. 3 g) zunächst lyophilisiert und anschließend homogenisiert. Vom so entstandenen Pulver wurden 0.3 bis 0.4 mg (im Idealfall 0.32 bis 0.35 mg) in Silberkapseln eingewogen, wie im Kapitel über die Phosphatfällung beschrieben. Dann waren die Proben bereit für die Massenspektrometrie. Auch hier diente der NBS 120C Standard als Referenz. Die Borstenproben wurden vor dem Mahlen und Lyophilisieren, wie in **Tabelle 10** beschrieben, gereinigt. Die Homogenisation und Einwaage der Borstenproben fand extern statt, weil hier eine präzisere Einwaage für das Erreichen stabiler Werte vonnöten war, wie Vorversuche gezeigt haben.

a) *Kryodestillation*

Um das in den organischen Proben enthaltene Wasser zu untersuchen, musste dieses zunächst so vollständig wie möglich aus den verschiedenen Materialien extrahiert werden. Wird nur ein Teil des Wassers entfernt, ist die Wahrscheinlichkeit für eine methodisch bedingte Fraktionierung hoch, wodurch die Ergebnisse verfälscht würden. Deshalb wurde das Wasser per kryogener Vakuumextraktion gewonnen. Diese Methode erzielt zuverlässige Ergebnisse und ist vor allem für Bodenmaterial und pflanzliche Proben gut etabliert (West et al. 2006, Koeniger et al. 2011). Sie ist neben der CO_2 -Equilibrierung eine der gängigsten Methoden zur Isotopenuntersuchung an in Feststoffen enthaltenem Wasser (Koehler et al. 2000, Lécuyer et al. 2009, Koeniger et al. 2011, Revesz et al. 2012, Ahrens et al. 2013). An tierischen Proben, wie Fleisch, Blut oder Milch wurden die Kryoextraktion bzw. ähnliche Techniken für die Sauerstoffisotopenanalyse seltener durchgeführt (Zimmermann & Cegla 1973, Boner & Förstel 2004, Crittenden et al. 2007, Chesson et al. 2010).



Abbildung 18 Aufbau der extern durchgeführten kryogenen Vakuumextraktion von Wasser im Labor des Kompetenzzentrum Stabile Isotope des Büsgen-Institutes unter Leitung von Dr. Jens Dyckmans.

Um ein, bezogen auf die stabilen Isotope im Wasser, authentisches Extrakt zu erhalten, wird bei der Kryodestillation eine Kombination aus Unterdruck und einem starken Temperaturgradienten (mehrere hundert Grad Celsius) angewandt. Im Vakuum wird das Probenmaterial erhitzt und das enthaltene Wasser so in das stark gekühlte Auffanggefäß befördert, wo es sofort gefriert.

Die Extraktionen wurden am Kompetenzzentrum Stabile Isotope am Büsgen-Institut der Georg-August-Universität Göttingen unter Leitung von Herrn Dr. Jens Dyckmans durchgeführt (Versuchsaufbau siehe **Abbildung 18**).

Die gefrorenen Proben wurden auf Eis verschickt um jeglichen Sauerstoffaustausch zwischen Gewebswasser und Trockenmasse zu unterbinden und anschließend, wie in **Tabelle 16** zusammengefasst, weiter bearbeitet.

Tabelle 16 Protokoll für den Ablauf der kryogenen Vakuumextraktion.

Vorbereiten und Einwiegen der Probengefäße	Probengläser und Auffanggläser für H ₂ O (ND4) abwiegen, dann Probenmaterial einfüllen	Einwaagemenge der Probe abhängig vom Wassergehalt des jeweiligen Materials
Schützen der Probe vor Kontamination	Etwas Glaswolle über der Probe platzieren	Schutz der Probe vor Kontamination durch Feststoffpartikel
Aufbau der Destillationsapparatur	Vakuumpumpe warmlaufen lassen, Flüssigen Stickstoff in die Kühlfalle füllen, abdecken der Kühlfalle mit Aluminiumfolie	
Vakuumaufbau in der Hauptlinie der Extraktionsanlage	Ventil zur Extraktionslinie öffnen, Druck: < 0,01 mbar	Ventile der Extraktionseinheiten müssen geschlossen sein
ND4-Gefäße befestigen	Proben- und Auffanggläser an den Extraktionseinheiten festschrauben	Handschuhe tragen
Gefrieren der Probengläser	Probengläser mit flüssigem Stickstoff im Dewargefäß gefrieren	
Start der Extraktion	Vakuum (<0,01 mbar) ansetzen, Flüssigstickstoff vom Probenglas entfernen und unter das Auffangglas stellen, Probengefäß mit Heizlampe erwärmen	Temperaturunterschied und Vakuum begünstigen die Destillation, Dauer der Destillation hängt vom Material ab
Beenden der Destillation	Extraktionsgläser entfernen	Zuerst Probenglas entfernen, um vakuumbedingten Verlust an Destillat zu verhindern
Auftauen der Proben	Gefrorene Wasserproben mit Deckel verschließen und auftauen lassen, Glaswolle entfernen	Wasser muss für die Massenspektrometrie flüssig sein
Auswaage des gewonnenen Wassers	Volle Wassergläschen wiegen und Ausbeute bestimmen	
Überführen in ND8 Probengläser	Wasserprobe mit Pipette in ND8-Gefäße überführen	Für jede Probe neue Pipette verwenden, Probe nun bereit für die Massenspektrometrie

10. Sauerstoffisotopenverhältnisse von Wasser

Die Trinkwasserproben mussten für die $\delta^{18}\text{O}$ -Messungen nicht weiter vorbereitet werden. Sie wurden luftdicht und unter Lichtausschluss zur externen massenspektrometrischen Untersuchung verschickt.

11. Massenspektrometrie

a) Strontium

Die Massenspektrometrie basiert auf der Auftrennung von Teilchen nach ihrer Masse, wodurch die Zusammensetzung der jeweiligen Bestandteile ermittelt werden kann. Auch die Verhältnisse stabiler Isotope eines Elementes lassen sich so bestimmen. Die Isotopenverhältnisse von Strontium und anderen schweren Elementen werden dabei in der Regel mit Feststoffmassenspektrometern gemessen (Vohberger 2011).

Nach dem Auftragen auf ein Filament wird die Probe durch starkes Erhitzen verdampft. Durch einen Elektronenstrahl werden die in die Gasphase übergegangenen Teilchen ionisiert und nachdem sie auf diese Weise positiv geladen sind, durch elektrische Felder im Vakuum beschleunigt. In einem zentralen Magnetfeld werden die Ionen dann aufgrund ihrer Trägheit unterschiedlich stark abgelenkt und so ihrer Masse entsprechend getrennt. Spezielle Kollektoren (Faraday-Cups) fangen die Teilchen auf, zählen diese und bestimmen so das Spektrum der in der Probe enthaltenen Bestandteile (Fry 2007). Das Prinzip beruht also auf der Tatsache, dass schwerere Ionen sich im Spektrometer träger verhalten und weniger stark von ihrer Flugbahn abgelenkt werden als leichte. Der prinzipielle Grundaufbau eines Massenspektrometers ist in **Abbildung 19** dargestellt.

Rubidium geht beim Erhitzen leichter in den gasförmigen Zustand über als Strontium. Deswegen kann durch langsames Erhöhen der Temperatur etwaiges Rubidium, das durch die Säulentrennung nicht entfernt wurde, isoliert werden, sodass die Messung der Strontiumisotopie dennoch möglich ist. Die Isotopenverhältnisse von Strontium werden im Massenspektrometer bis auf die fünfte Nachkommastelle genau gemessen, der Messfehler ist somit geringer als die natürliche Variabilität

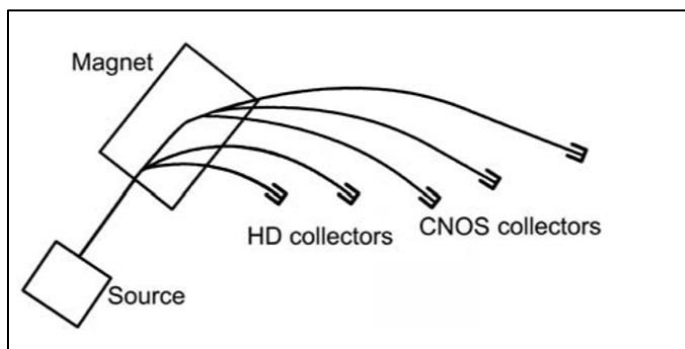


Abbildung 19 Funktionsweise eines Massenspektrometers.
Aus: Fry (2007).

(Price et al. 2002, Tütken 2010). Diese hohe Präzision ermöglicht die spätere geobiologische Interpretation der Daten und das Identifizieren möglicher Unterschiede.

Die massenspektrometrischen Messungen der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Isotopenverhältnisse wurden von Herrn Prof. Dr. Stefan Hölzl und Frau Dipl.-Biol. Karin Heck am Rieskratermuseum Nördlingen durchgeführt. Die Proben wurden dabei jeweils in drei Blöcken neunzehnmal gemessen.

Zur Qualitätskontrolle wurde der Standard SRM 987 mitgeführt. Das Messergebnis jeder Probe besteht

also aus dem Mittel von 57 Einzelwerten. Die Messungen ergaben einen relativen Messfehler von ± 0.00001 .

b) Sauerstoff

Die Isotopenverhältnisse des aus den mineralisierten Hartgeweben extrahierten Phosphates und der entwässerten Feststoffproben (Futter, Borsten, Weichgewebe und Blut) wurden von Herrn Dr. Christoph Mayr am Institut für Geographie der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg über ein Pyrolyseverfahren mit einem Gasquellen-IRMS (isotope ratio mass spectrometer) gemessen. Wie bei der Feststoffmassenspektrometrie wird die aufgetragene Probe zunächst verdampft und dann mittels einer ionisierenden Faser aufgeladen und als positiv geladener Ionenstrahl im Hochvakuum beschleunigt. Genau wie die Messung der schweren Isotopenverhältnisse beruht das Prinzip der Analyse auf der unterschiedlichen Ablenkung von geladenen Teilchen verschiedener Masse im Magnetfeld aufgrund ihrer Trägheit. Für die Messung der Sauerstoffisotopenverhältnisse der Proben dieser Arbeit wurde ein Isotopenverhältnis-Massenspektrometer (DeltaV, Advantage, Thermo) verwendet. Zur Qualitätskontrolle wurde der Standard NBS 120c mitgeführt.

Nachdem zunächst die Proben bei 60 °C für 48 Stunden noch einmal vollständig vakuumgetrocknet worden waren, wurden sie in einem, an das Spektrometer angeschlossenen, HT-O Pyrolyseofen (Hekatech) unter Anwesenheit von Glaskohlenstoff in einem Siliziumcarbidrohr bei ca. 1490 °C zu Kohlenmonooxid (CO) umgesetzt und dieses anschließend im Massenspektrometer vermessen (siehe auch Mayr et al. (2016)). Bei leichten Isotopen wird die δ -Notation verwendet, das heißt, die Probe wird mit einem Referenzstandard verglichen, der gleichzeitig gemessen wird. Für Sauerstoff ist dieser Vergleichswert der internationalen Standard V-SMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water). Die jeweilige Isotopie wird dann in Promille angegeben. Je nachdem, ob die Probe relativ zur Standardprobe mehr oder weniger schwere Isotope enthält, ändert sich der Messwert. Positivere Messergebnisse bedeuten eine relative Anreicherung mit schweren Isotopen. Der relative Messfehler bei der Analyse im Gasquellen-IRMS beträgt etwa 10^{-2} . Bei diesem Verfahren wird also das Verhältnis sämtlichen in der Probe enthaltenen Sauerstoffs gemessen, was im Falle der Trockenmasse der Weichgewebe, des Blutes und des Futters, sowie den Borsten, sämtlichen Sauerstoffes entspricht, den das entsprechende Material abgesehen von Wasser enthält. Im Falle der mineralisierten Hartgewebe entspricht die Messung, dank der zuvor durchgeführten Phosphatfällung nur dem Sauerstoff des Knochen- bzw. Zahnschmelzphosphates.

Die Messung des im Trinkwasser enthaltenen Sauerstoffs (und Wasserstoffs) wurde mit einem IRIS- (Isotope ratio infrared spectrometry)-Analysegerät per (High temperature conversion elemental analysis) bestimmt. $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^2\text{H}$ können hier parallel bestimmt werden. Die Analyse basiert auf dem Prinzip der Resonatorabklingzeit-Spektroskopie (wavelength-scanned cavity ring-down spectroscopy), wobei elektrische Energie durch den Umlauf zuvor in den Resonator eingestrahelter elektromagnetischer Strahlung zwischen zwei Spiegeln gespeichert wird. Die Ergebnisse werden ebenfalls, wie oben beschrieben, in der δ -Notation, also im Verhältnis zu einem Standardwert (in diesem Fall: Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW)) in Promille (‰) angegeben:

$$\delta = (R_{\text{sample}}/R_{\text{reference}} - 1)$$

Hier ist R das Verhältnis der Anzahl (n) an schweren und leichten Isotopen eines Elementes in der Probe und dem Referenzwert des Standards (Coplen 2011).

Ergebnisse (Strontium)

Vier aufeinanderfolgende Injektionen jeder Probe wurden gemessen, auf die mögliche Verschleppung (von Probe zu Probe) korrigiert und gemittelt. Die Datensätze wurden des Weiteren während der Durchführung bezüglich Gerätedrift auf die VSMOW/SLAP (Standard Light Antarctic Precipitation) Skala korrigiert, indem jeweils ein Wert von 0 ‰ und –55.5 ‰ für $\delta^{18}\text{O}$ bzw. 0 ‰ und –427.5 ‰ für $\delta^2\text{H}$ to VSMOW2 und SLAP2 zugeordnet wurden (Brand et al. 2014). Zur Normalisierung wurden zwei laborinterne Standards, die direkt auf VSMOW2 und SLAP2 kalibriert waren, bei jedem Durchgang mitgeführt. Die externe Reproduzierbarkeit liegt laut wiederholten Testmessungen einer Kontrollprobe bei einer Präzision von weniger als 0.1 ‰ für $\delta^{18}\text{O}$ und bei weniger als 1 ‰ (± 1 sigma) für $\delta^2\text{H}$. Eine genauere Beschreibung der Messprozedur ist bei Van Geldern & Barth (2012) nachzulesen. Die Analyse der Trinkwasserproben wurde von Herrn PD Dr. Robert van Geldern im GeoZentrum Nordbayern der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg durchgeführt.

Dieselbe Methode wurde für das aus dem Weichgewebe, dem Blut und dem Futter extrahierte Wasser angewandt. Nachdem das Gewebwasser, wie zuvor beschrieben durch die kryogene Vakuumextraktion isoliert wurde, wurde es ebenfalls von Herrn Dr. Jens Dyckmans, am Kompetenzzentrum Stabile Isotope (Büsgen-Institut der Georg-August-Universität Göttingen), spektrometrisch vermessen. Es wurde die exakt selben Schritte eingehalten, wie bei den Trinkwassermessungen, mit der Ausnahme, dass die Nachlaufkorrektur nicht wie bei Van Geldern & Barth (2012) beschrieben, sondern mit zwei anderen, vergleichbaren und ebenfalls über SMOW/SLAP eingeeichten Laborstandards, durchgeführt wurde.

Listen der in den verschiedenen zuvor beschriebenen Aufbereitungs-, Extraktions- und Messmethoden verwendeten Chemikalien und Geräte finden sich im Anhang (**Tabelle 57** und **Tabelle 58**).

III. Ergebnisse (Strontium)

Die Ergebnisse der Strontiumuntersuchungen wurden vom Autor teilweise bereits im Zuge einer internationalen Publikation veröffentlicht (Anders et al. 2018). Tabellen und Abbildungen, für welche dies zutrifft, sind entsprechend gekennzeichnet.

A. Ergebnisse der Konzentrationsbestimmungen

Der Gehalt von Strontium wurde an insgesamt 48 Proben bestimmt, davon acht Bodenauszüge, vier Wasser-, achtzehn Futter- und achtzehn Schweineproben. In **Tabelle 62** im Anhang finden sich alle Messergebnisse der einzelnen durchgeführten Konzentrationsbestimmungen, sowie dem mitgeführten Standard NBS NIST 1400. Sie sind auch zusammen mit den entsprechenden $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Messergebnissen in **Tabelle 59** aufgeführt. Die insgesamt höchsten Konzentrationen an Strontium finden sich im Mineralfutteranteil, der in der Getreidefuttermischung enthalten war (71.1 - 110 $\mu\text{g/g}$) und im Knochenapatit (86.9 - 95.8 $\mu\text{g/g}$). Die niedrigsten Konzentrationen ließen sich in den Weichgewebeproben feststellen (0.017 – 0.05 $\mu\text{g/g}$). Betrachtet man die einzelnen Probenkategorien näher, so findet sich bei den Bodenauszügen eine mittlere Strontiumkonzentration von 9.3 $\mu\text{g/g}$, mit einer Standardabweichung von 2.5 $\mu\text{g/g}$. Deutlich geringere Konzentrationen an Strontium enthält dagegen das gemessene Trinkwasser mit einem Mittelwert von 0.1 $\mu\text{g/g}$ und einer Standardabweichung von 0.05 $\mu\text{g/g}$. Die Wasserproben sind also auch weniger variabel als die Bodenauszüge (siehe **Abbildung 20**).

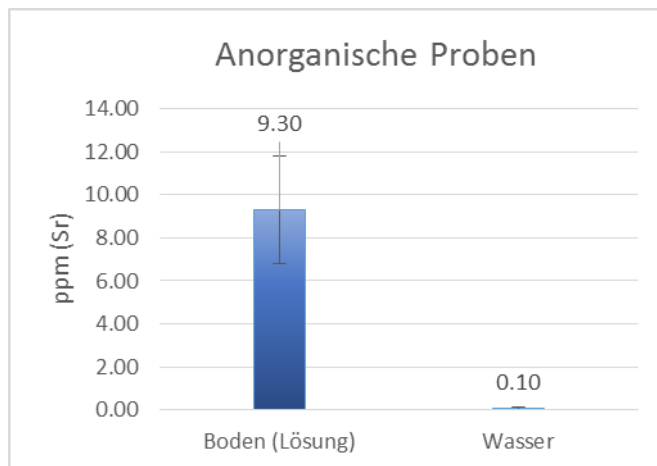


Abbildung 20 Strontiumkonzentrationen der gemessenen Bodenlösungen ($n = 8$) und Wasserproben ($n = 3$) mit Angabe des Mittelwertes und Anzeige der Standardabweichung. Die Konzentration in den Bodenaufschlüssen ist fast einhundertmal so hoch wie die in den Trinkwasserproben und schwankt auch deutlich stärker.

Bei den Futterproben ergeben sich deutliche Unterschiede bei den Strontiumkonzentrationen, sowohl zwischen verschiedenen Futtertypen, als auch bei den verschiedenen

Bestandteilen einzelner Futtertypen. Insgesamt sind, wie in **Abbildung 21** zu erkennen, die Konzentrationen in Gras und Silage am höchsten, also im Niedrigenergiefutter. Hierzu passt auch die Tatsache, dass innerhalb der organischen Bestandteile der Getreidemischung die höchsten Konzentrationen in den Unkräutern vorhanden sind und auch Heu bzw. Stroh sehr hohe Konzentrationen aufweist. Der strontiumärmste Futtertyp sind die Kartoffeln (ca. $0.6 \mu\text{g/g}$). Allerdings ist in der Molke, die stets in Kombination mit Brot gefüttert wurde, der Anteil an Strontium mit $0.1 \mu\text{g/g}$ noch deutlich geringer. Wie in **Abbildung 22** zu erkennen wird die Gesamtkonzentration des Brot-Molke-Gemisches sehr stark vom Brot bestimmt, welches sehr viel höhere Konzentrationen aufweist.

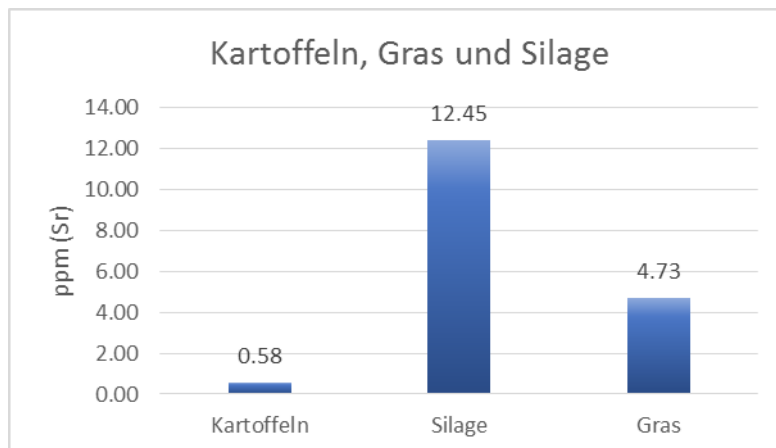


Abbildung 21 Strontiumkonzentrationen der Kartoffeln und der Niedrigenergiefuttertypen Gras und Silage (jeder Futtertyp nur einmal gemessen).

In ähnlicher Weise existieren auch deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Bestandteilen der Getreidemischung: Während die einzelnen enthaltenen Getreidesorten (Roggen, Weizen, Hafer,

Erbsen, Buchweizen), welche mengenmäßig die Hauptbestandteile der Mischung ausmachten, sich nicht stark voneinander unterscheiden ($0.9 - 2.4 \mu\text{g/g}$), weisen die Unkräuter und das enthaltene *Galium sp.* höhere Konzentrationen auf. Sie waren aber nur in marginalen Mengen in der Mischung vorhanden. Am deutlichsten unterscheidet sich jedoch das beigemengte Mineralfutter vom Rest der Bestandteile: Hier ist der Strontiumgehalt zwanzig- bis dreißigmal höher als die Konzentration der Gesamtmischung (siehe **Abbildung 23**).

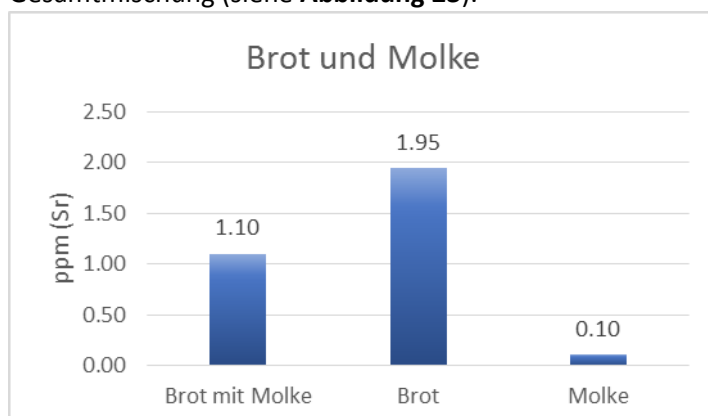


Abbildung 22 Strontiumkonzentration des Brot-Molke-Gemisches ($n = 1$) und der enthaltenen Molke ($n = 2$) bzw. des enthaltenen Brotes ($n = 1$) im Einzelnen. Im Brot ist der Strontiumgehalt fast zwanzigmal höher, weswegen es einen stärkeren Einfluss auf die Gesamtzusammensetzung des Futtertyps hat.

Ergebnisse (Strontium)

Obwohl der Mineralfutteranteil in der Getreidemischung nur ca. ein bis drei Prozent beträgt, ist sein Beitrag zur Strontiumzusammensetzung der Mischung also beträchtlich. Verglichen mit der Getreidemischung haben die Kartoffeln als zweiter Futtertyp der Kategorie „Hochenergiefutter“ deutlich niedrigere Strontiumanteile. Am mitgeführten Heustandard IAEA-V-10 wurde eine Strontiumkonzentration von $38 \pm 0.5 \mu\text{g/g}$ bestimmt (95%-Konfidenzintervall laut Hersteller: 37-44 $\mu\text{g/g}$).

Die Strontiumkonzentrationen der verschiedenen Schweinegewebe werden in **Abbildung 24** verglichen. Mittelwerte und Standardabweichungen werden für Probenotypen angegeben, bei denen mehr als eine Probe analysiert wurde. Wie man sieht, weisen mineralisierte Hartgewebe die mit Abstand höchsten Strontiumkonzentrationen auf. Knochenapatit enthielt im Vergleich zum Zahnschmelz höhere Mengen an Strontium. Bei den Weichgeweben war die Strontiumkonzentration relativ konstant, wie auch in **Abbildung 25** zu erkennen. Der Zahnschmelz enthält in etwa die zweitausendfache Menge des Strontiums in den Weichgeweben, der Knochen sogar mehr als die dreitausendfache Menge. Der mitgeführte Standard NBS NIST 1400 („bone ash“) ergab eine mittlere Strontiumkonzentration von $247 \pm 4 \mu\text{g/g}$ (Herstellerangabe: $249 \pm 7 \mu\text{g/g}$).

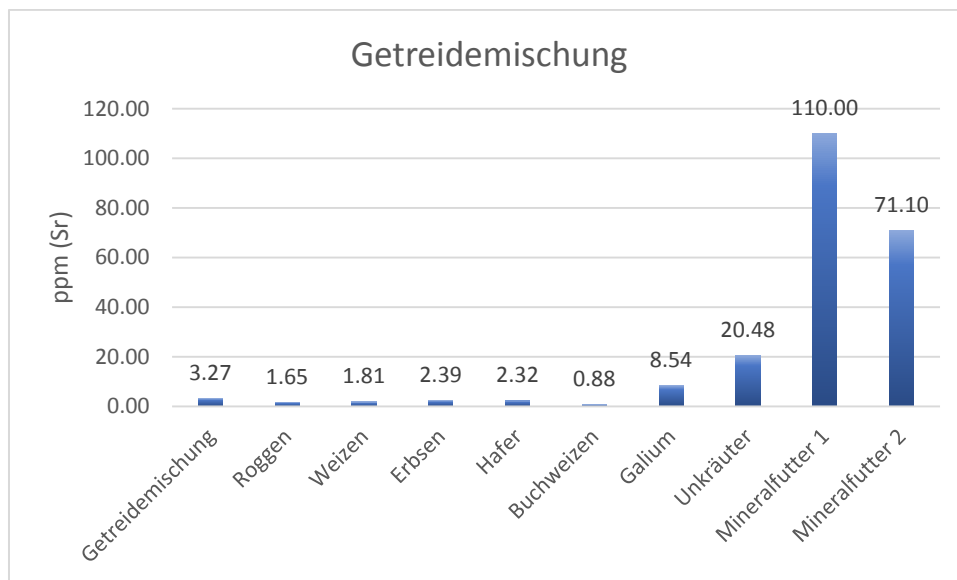


Abbildung 23 Strontiumkonzentration der Getreidemischung und ihrer einzelner Bestandteile (jeweils $n = 1$). Das beigemengte Mineralfutter weist deutlich höhere Konzentrationen auf, als die übrigen Bestandteile.

Ergebnisse (Strontium)

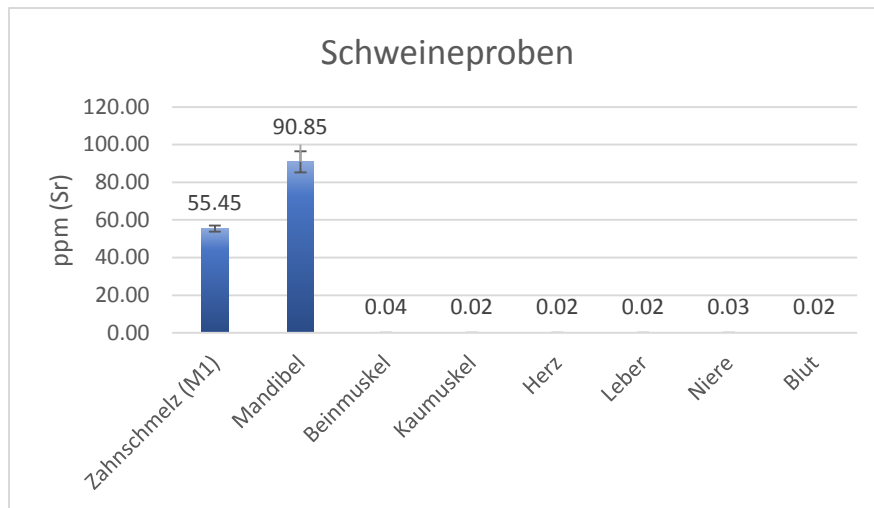


Abbildung 24 Strontiumkonzentrationen der verschiedenen untersuchten Schweineproben. Die mineralisierten Hartgewebeprouben weisen sehr viel höhere Konzentrationen auf, als die Weichgewebe ($n_{\text{Zahnschmelz}} = 2$, $n_{\text{Mandibel}} = 2$, $n_{\text{Beinmuskel}} = 4$, $n_{\text{Kaumuskel}} = 2$, $n_{\text{Herz}} = 2$, $n_{\text{Leber}} = 2$, $n_{\text{Niere}} = 2$, $n_{\text{Blut}} = 1$).

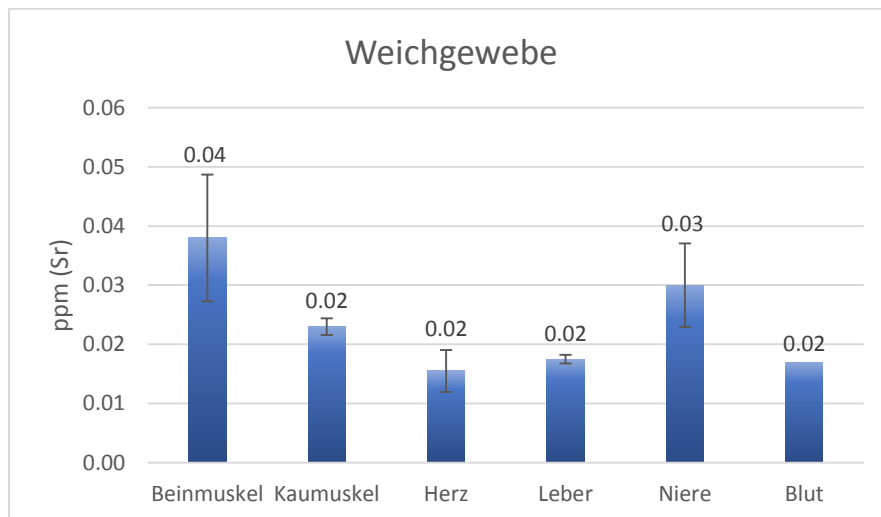


Abbildung 25 Strontiumkonzentrationen der verschiedenen Weichgewebe mit Angabe von Mittelwert und Anzeige der Standardabweichung. Die Konzentrationen der verschiedenen Gewebe bewegen sich in einer ähnlichen Größenordnung.

B. Ergebnisse der Isotopenmessung

Insgesamt wurde das $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis an 142 Proben bestimmt, davon 14 Bodenauszüge, acht Wasserproben, 59 Futterproben und 61 Schweineproben. Der Standard NBS NIST 1400 („bone ash“) wurde zehnmal neben den Proben mitgeführt, mit einem Mittelwert von 0.71306 und einer Standardabweichung von 0.00003 (siehe **Tabelle 60** im Anhang). Der Standard SRM 987 wurde fünfundfünfzigmal gemessen, mit einem Mittelwert von 0.71020 und einer Standardabweichung von 0.00005 (siehe **Tabelle 61** im Anhang). Anhand der Normalisierung auf den in Nördlingen mitgeführten Standard SRM 987 konnte eine Messpräzision von 0.00001 erzielt werden. Die Variabilität bzw. Bandbreiten der Verteilung der einzelnen Probenotypen und jeweiligen Unterkategorien sind in **Tabelle 17** zusammengefasst.

Ergebnisse (Strontium)

Tabelle 17 Beobachtete Variabilität der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verteilung im Gesamtdatensatz und verschiedenen Teilkategorien (einschließlich Boden-, Wasser-, Futter- und Schweineproben) und wiederum Unterstichproben dieser.

Probentyp		n	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Bereich	Δ
Gesamt		137	0.706927 - 0.748248	0.04132
Gesamt ohne Boden		123	0.706927 – 0.716718	0.00979
Boden	Gesamt	14	0.714247 – 0.748248	0.03400
	Boden Hof	8	0.716741 – 0.748248	0.03151
	Boden Felder	6	0.714247 – 0.736024	0.02178
Wasser	Gesamt	8	0.713120 – 0.715449	0.00233
	Quellwasser	6	0.714847 – 0.715449	0.00060
	Leitungswasser	2	0.713120 – 0.713138	0.00002
Futter	Gesamt	54	0.706927 – 0.716718	0.00979
	Kartoffeln	5	0.707055 – 0.711023	0.00397
	Getreide	6	0.706988 – 0.710354	0.00337
	Getreide Bestandteile (ohne Mineralfutter)	10	0.706927 – 0.711132	0.00421
	Mineralfutter	3	0.707619 – 0.710230	0.00261
	Brot mit Molke	3	0.710732 – 0.711241	0.00051
	Brot	5	0.708538 – 0.712486	0.00395
	Molke	4	0.712449 – 0.716708	0.00426
	Silage	5	0.711036 – 0.713857	0.00282
	Gras	12	0.709228 – 0.716718	0.00749
	Gesamt	61	0.709810 – 0.711979	0.00217
Schweine	Ferkel (2 Individuen)	13	0.709810 – 0.711265	0.00146
	Schweine (4 Individuen)	48	0.710650 – 0.711195	0.00055
	Zähne	14	0.710123 – 0.711979	0.00186
	Milchzähne	6	0.710123 – 0.710607	0.00048
	M1	4	0.710600 – 0.711098	0.00050
	M3	4	0.711577 – 0.711979	0.00040
	Knochen	23	0.709810 – 0.711752	0.00194
	Ferkel (2 Individuen)	5	0.709810 – 0.710829	0.00102
	Schweine (4 Individuen)	18	0.711312 – 0.711752	0.00044
	Weichgewebe	24	0.710077 – 0.711821	0.00174
	Ferkel (2 Individuen)	2	0.711265 – 0.710822	0.00044
	Schweine (4 Individuen)	22	0.710077 – 0.711821	0.00174

Ergebnisse (Strontium)

Die grobe Verteilung der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werte ist in Abbildung 26 als Boxplots abgebildet. Wie **Tabelle 18** zu entnehmen, in der die Tests der einzelnen Probenkategorien auf Normalverteilung angegeben sind, unterscheiden sich sowohl die Boden- als auch die Wasser- und Futterproben nicht signifikant von einer Normalverteilung. Die Auszüge aus den Bodenproben weisen sowohl die insgesamt höchsten $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse auf, als auch die größte Bandbreite in der Verteilung ($\Delta = 0.034$). Sie überschneiden sich nur minimal mit den gemessenen Trinkwasser-/Futterproben und überhaupt nicht mit den untersuchten Proben der Schweine.

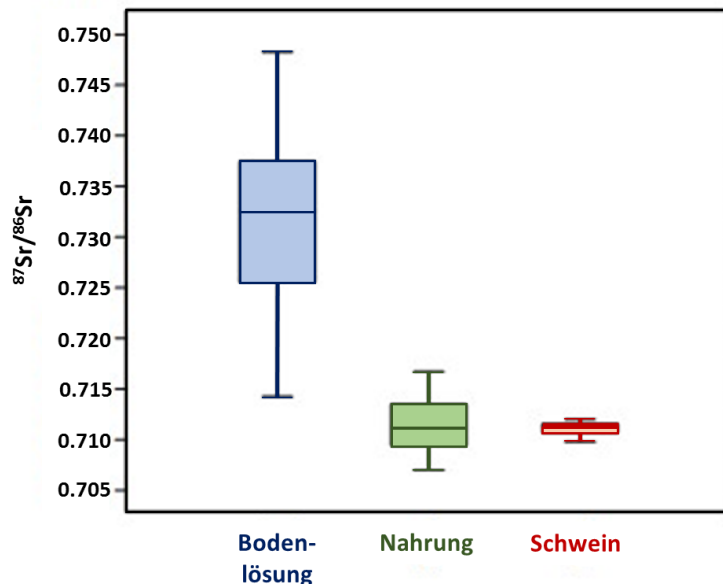


Abbildung 26 Verteilung der stabilen Strontiumisotopenverhältnisse der Bodenlösungen ($n = 14$), Nahrungsbestandteile ($n = 45$) und Schweineproben ($n = 61$, ohne Borsten). Die Bodenproben weisen eine deutlich höhere Variabilität und auch insgesamt höhere $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werte auf. Sie überschneiden sich kaum, bzw. gar nicht mit den Nahrungs- bzw. Schweineproben. Die geringste Variabilität findet sich in den Schweineproben.

Tabelle 18 Normalverteilungstests für Stichproben und Teilstichproben von Boden-, Nahrungs- und Schweineproben aller untersuchten Gewebetypen mit Ausnahme der Borsten (s.u.). Nur die Schweinedaten weichen, im Gegensatz zu Boden, Trinkwasser und Futter signifikant von einer Normalverteilung ab.

Stichprobe	Stichproben- größe (n)	p-Wert (Shapiro- Wilk)
Boden	14	0.98
Wasser	6	0.46
Futter	39	0.26
Gras/Silage	17	0.36
Brot/Molke	8	0.18
Getreide / Kartoffeln	14	0.77
Schweine	61	$3 \cdot 10^{-5}$
Weichgewebe	24	0.01
Hartgewebe	26	$6 \cdot 10^{-5}$

Der Mittelwert der Bodenproben unterscheidet sich hochsignifikant von Futter-, Wasser- und Schweineproben (siehe **Tabelle 19**). Am zweitstärksten streuen die Nahrungsproben, insbesondere die Futterproben ($\Delta = 0.0098$). Futtermittel, die nachweislich nur in vernachlässigbaren Mengen konsumiert wurden (Apfel, Einstreu) wurden hierbei nicht miteinbezogen. Am einheitlichsten stellen sich bei weitem die Schweineproben dar, mit einer Gesamtstreuung von $\Delta = 0.00217$ (siehe auch **Abbildung 26** bzw. **Tabelle 17**). Bei den Isotopenverhältnissen der Wasserproben unterscheidet sich

Ergebnisse (Strontium)

das Leitungswasser geringfügig vom Quellwasser. Leitungswasser wurde allerdings im Versuchszeitraum nicht von den Tieren als Trinkwasser konsumiert.

Betrachtet man die Nahrungsproben im Einzelnen näher (siehe **Abbildung 27**), so zeigt sich, dass das Trinkwasser eine sehr viel geringe Streuung aufweist, als die Futterproben und sich in seinen $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werten nicht mit denen der Schweine überschneidet. Die Mittelwerte von Trinkwasser und Schweineproben sind infolgedessen auch signifikant verschieden (siehe **Tabelle 19**). Auch Wasser- und Futterproben unterscheiden sich in ihren Mittelwerten signifikant voneinander. Dies gilt nicht für den Vergleich von Schweine- und Futterproben. Hier sind die Mittelwerte nicht statistisch zu unterscheiden.

Tabelle 19 Test auf gleiche Mittelwerte der verschiedenen Probenotypen und der verschiedenen Futterkategorien. Für den Vergleich zweier normalverteilter Stichproben wurde der T-Test verwendet (sämtliche Umwelt- und Nahrungsproben), für den Vergleich signifikant von einer Normalverteilung abweichender Stichproben der Mann-Whitney-Test (alle Vergleiche mit den Schweineproben).

Umwelt-, Nahrungs- und Schweineproben			
	Boden	Futter	Wasser
Futter	$P = 3.5 \cdot 10^{-17}$		
Wasser	$P = 0.0006$	$P = 0.0001$	
Schweine	$P = 6.7 \cdot 10^{-9}$	$P = 0.56$	$P = 6.1 \cdot 10^{-5}$
Futter Unterkategorien			
	Gras/Silage	Brot/Molke	
Brot/Molke	$P = 0.06$		
Getreide/Kartoffeln	$P = 1.8 \cdot 10^{-6}$	$P = 0.0007$	

Unterteilt man die Futterproben in die drei Kategorien „Niedrigenergiefutter“ (Gras und Silage), „Brot mit Molke“ und „Hochenergiefutter“ (Getreidemischung und Kartoffeln), so zeigen sich auch innerhalb des Futters merkliche Unterschiede: Das Niedrigenergiefutter weist die höchsten $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse auf, das Hochenergiefutter die niedrigsten. Die Isotopenverhältnisse von Brot und Molke liegen dazwischen. Während der p-Wert für den Vergleich zwischen Niedrigenergiefutter und Brot mit Molke knapp oberhalb des Signifikanzniveaus liegt, sind die Unterschiede für die übrigen Vergleiche eindeutig signifikant (siehe **Tabelle 19**).

Ergebnisse (Strontium)

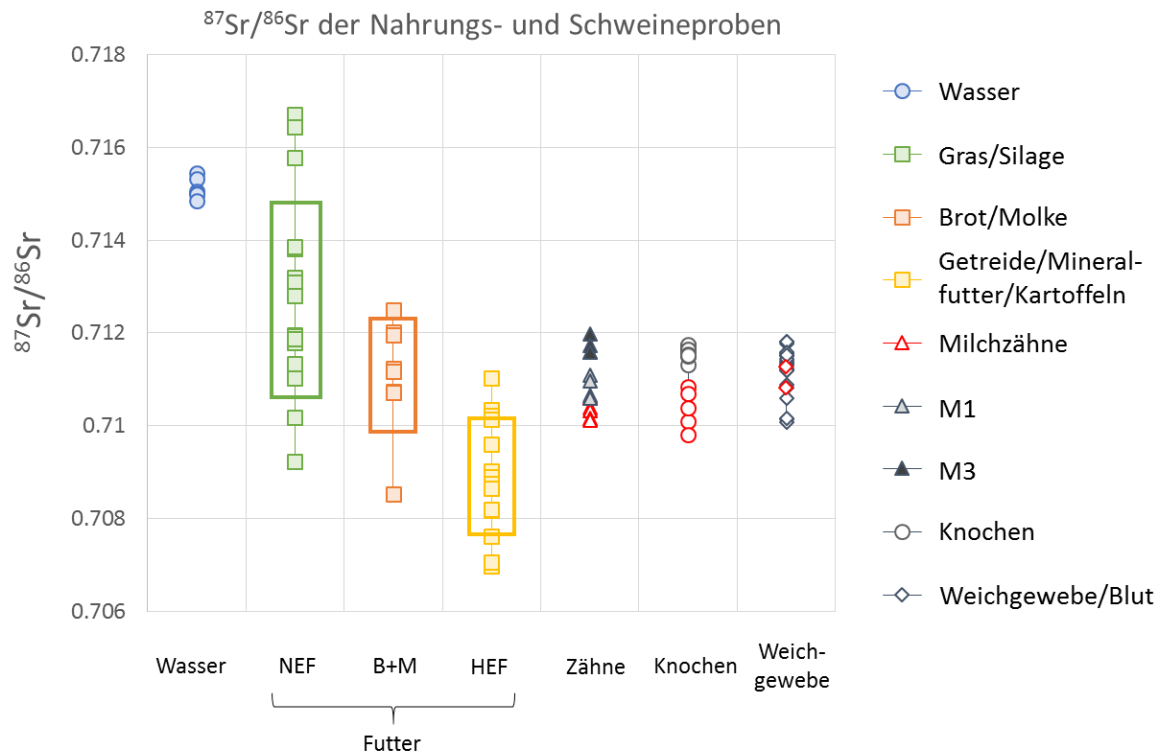


Abbildung 27 Ergebnisse der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Messungen von Schweine und Nahrungsproben (Trinkwasser und Futter) nach Probenart. Die Futterproben sind nach den drei Kategorien NEF = Niedrigenergiefutter (Gras/Silage), B+M = Brot mit Molke und HEF = Hochenergiefutter (Getreidemischung/Kartoffeln) aufgeteilt. Der Mittelwert \pm die einfache Standardabweichung ist für jede Futterkategorie als farbiger Kasten angegeben. Bei den Schweineproben wird nach Zahn-, Knochen und Weichgewebeproben unterschieden. Rot markiert sind hier die Proben, die von den beiden Ferkeln stammen.

Die $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werte der Körperbestandteile der sechs untersuchten Individuen verteilen sich über eine Gesamtbandbreite von 0.70981 bis 0.71573. Der gesamte Datensatz aller untersuchten Schweineproben ist nicht normalverteilt ($p = 4 \cdot 10^{-9}$, Shapiro-Wilk). Dies zeigt sich besonders deutlich im Kernel-Density-Schätzungsdiagramm, das die drei untersuchten Borsten deutlich als extreme Ausreißer darstellt (**Abbildung 28 A**). Die Mittelwerte von Borstenproben und dem Rest der Schweinedaten unterschieden sich deutlich voneinander ($p = 0.004$, Mann-Whitney). Daher wurden Borstenproben von der Analyse und Interpretation ausgeschlossen. Eine detaillierte Begründung hierzu findet sich im Diskussionsteil ab Seite 107. Die restlichen Daten reichen von 0.70981 (Unterkiefer, Individuum 1) bis 0.71198 (dritter Molar, Individuum 4) ($\Delta = 0.00217$).

Ergebnisse (Strontium)

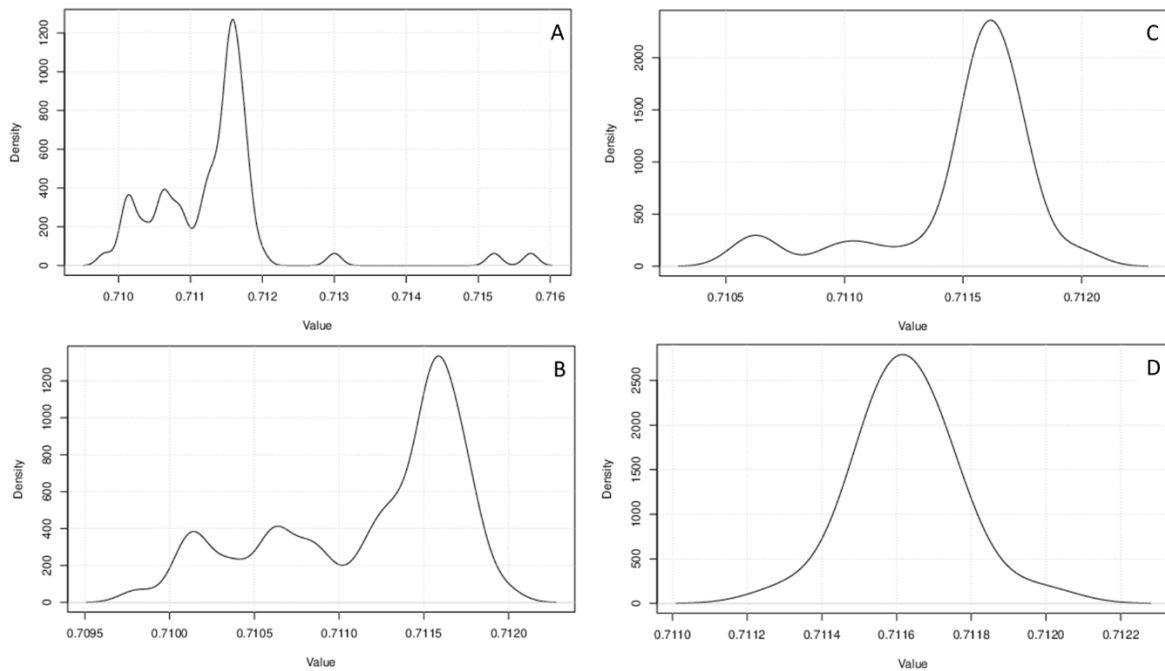


Abbildung 28 Kernel-Density-Graphen von verschiedenen $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Datensätzen der untersuchten Proben (Bandwidth: 0.0001). **A: Gesamtdatensatz der Schweineproben:** Die drei Borstenproben können eindeutig als Ausreißer auf der rechten Seite erkannt werden. Die Daten sind hier nicht normalverteilt ($p = 4 \cdot 10^{-9}$, Shapiro-Wilk). **B: Alle Schweinedaten ohne Borstenproben:** Eine Normalverteilung liegt nach wie vor nicht vor ($p = 3 \cdot 10^{-5}$, Shapiro-Wilk). **C: Adulte Schweine (nur mineralisierte Hartgewebe):** Die Kurve wird leicht geglättet, indem die Ferkelpuben von den Proben der adulten Tiere getrennt werden und die Weichgewebepuben herausgenommen, trotzdem gibt es nach wie vor eine starke Abweichung auf der linken Seite, welche durch die ersten Molaren verursacht wird ($p = 6 \cdot 10^{-5}$, Shapiro-Wilk). **D: Adulte Schweine (nur Hartgewebe ohne M1):** Wenn die früh mineralisierenden ersten Molaren herausgenommen werden, folgen die übrigen Hartgewebepuben der Schweine nun einer Normalverteilung ($p = 0.93$, Shapiro-Wilk) (Anders et al. 2018).

Lässt man also die Borstenproben außen vor, dann streuen die Schweineproben von allen Probenarten in sich am wenigsten und keiner der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werte der Schweine liegt außerhalb der Bandbreite des Futters. Auch ohne die Borstenproben ist der Datensatz der Schweineproben noch nicht normalverteilt ($p = 3 \cdot 10^{-5}$, Shapiro-Wilk, **Abbildung 28 B**). Insgesamt unterscheiden sich die Weichgewebe im Mittel nicht signifikant vom Mittelwert der Hartgewebe ($p = 0.5$). Trennt man die beiden untersuchten Altersklassen (Ferkel und Schweine) voneinander, so sind die Ferkeldaten für sich alleine normalverteilt ($p = 0.98$, Shapiro-Wilk), was auch für die Teilstichprobe der Hartgewebe der Ferkel gilt ($p = 0.97$). Im Gegensatz dazu sind die Daten der adulten Schweine immer noch nicht normalverteilt ($p = 6 \cdot 10^{-6}$, Shapiro-Wilk), ebenso wenig wie die Teilproben von Weich- ($p = 0.007$) und Hartgeweben ($p = 6 \cdot 10^{-5}$, **Abbildung 28 C**). Das Entfernen von früh mineralisierenden Zähnen aus der Stichprobe der Schweinehartgewebe führt jedoch zu einer Normalverteilung ($p = 0.93$, Shapiro-Wilk), die auch in **Abbildung 28 D** zu sehen ist. Die Mittelwerte von Schweine- und Ferkeldaten unterscheiden sich deutlich voneinander ($p = 6 \cdot 10^{-6}$, Mann-Whitney). Dieser Effekt verstärkt sich sogar noch weiter, wenn die ersten Molaren, die durch ihre frühe Entstehungszeit ein recht junges Lebensalter repräsentieren (zeitlich zwischen den Ferkeln und den Schweinen), aus dem Probenatz entfernt werden. Der Vergleich der Hartgewebe von Ferkeln und Schweinen (ohne M1) führte zu hochsignifikanten Unterschieden zwischen den Mittelwerten ($p = 1.5 \cdot 10^{-14}$, T-Test), dasselbe gilt für den Vergleich von Ferkel- und Schweineknochen ($p = 8 \cdot 10^{-11}$, T-Test).

Der Mann-Whitney-Test ergab beim Vergleich einzelner Individuen untereinander (alle Gewebe, außer Borsten), dass Individuen derselben Altersgruppe (Ferkel = Individuen 1 und 2 oder Schweine = Individuen 3-6) keine signifikanten Unterschiede aufweisen, während Individuen verschiedener

Ergebnisse (Strontium)

Altersgruppen sich signifikant voneinander unterscheiden. Die konkreten p-Werte hierzu finden sich in **Tabelle 20**.

*Tabelle 20 p-Werte der Mann-Whitney-Tests auf gleiche Mittelwerte zwischen den einzelnen Individuen (alle Gewebetypen, außer Borsten) (Anders et al. 2018). Individuen verschiedener Altersklassen („Ferkel vs. Schweine“) sind signifikant verschieden voneinander (**fett gedruckt**), die Individuen derselben Altersklassen unterscheiden sich nicht signifikant voneinander (schräg gedruckt).*

Individuum	1	2	3	4	5
1					
2	0.72				
3	0.02	0.04			
4	0.05	0.01	0.95		
5	0.0008	0.0008	0.42	0.82	
6	0.002	0.003	0.98	0.95	0.49

Tabelle 21 Interindividuelle Variabilität der Strontiumisotopenverhältnisse (Anders et al. 2018): Variabilität der Probenotypen. Die niedrigsten Bandbreiten finden sich in den distalen Knochen der Extremitäten (Metatarsi und Phalanges, nur für adulte Schweine gemessen). Die höchste Variabilität findet sich in den Borstenproben (welche aus der späteren Interpretation herausgenommen wurden), gefolgt von den Mandibelproben (welche auch für die Ferkel gemessen werden konnten).

	Min	Max	Δ	Anzahl an Individuen ¹	Untersuchte Individuen ²	Anzahl an Proben pro Individuum ³
Zähne	0.71012	0.71198	0.00186	6	1-6	1-3
Milchzahn	0.71012	0.71061	0.00049	2	1-2	3
M1	0.71060	0.71110	0.00050	4	3-6	1
M3	0.71158	0.71198	0.00040	4	3-6	1
Knochen	0.70981	0.71175	0.00194	6	1-6	1
Pars petrosa	0.71009	0.71171	0.00162	6	1-6	1
Mandibel	0.70981	0.71174	0.00193	5	1, 3-6	1
Femur	0.71038	0.71168	0.00130	6	1-6	1
Metatarsus				4	3-6	1
+ Phalanges	0.71151	0.71175	0.00024			2
Fleisch	0.71008	0.71181	0.00173	6	1-6	1
Beinmuskel	0.71008	0.71126	0.00118	6	1-6	1
Kaumuskel	0.71017	0.71181	0.00164	4	3-6	1
Organe	0.71088	0.71182	0.00094	4	3-6	1
Herz	0.71118	0.71152	0.00034	3	3, 5-6	1
Leber	0.71088	0.71182	0.00094	4	3-6	1
Niere	0.71134	0.71177	0.00043	4	3-6	1
Blut	0.71120	0.71158	0.00038	3	4-6	1
(Borsten)	0.71300	0.71573	0.00273	3	3-5	1

¹ Anzahl von Individuen, von denen der entsprechende Probenotyp gemessen und in die Interpretation einbezogen werden konnte.

² Individuen von den Ferkeln (Individuum 1 und 2) bis hin zu den adulten Schweinen (Individuen 4-6), die einbezogen werden konnten.

³ Anzahl von Proben, die vom entsprechenden Typ pro Individuum gemessen wurden (3 Milchzähne wurden jeweils pro Ferkel analysiert).

Tabelle 21 zeigt die interindividuelle Variabilität für jeden Probentyp. Für Zähne, Knochen, Fleisch und Organe sind die Bereiche auch für bestimmte Subtypen der jeweiligen Kategorie angegeben. Die weitesten Bandbreiten finden sich bei jenen Probentypen, die nicht nur für die vier erwachsenen Schweine, sondern auch für die beiden Ferkel analysiert wurden: Zähne (permanente Molare und Milchzähne), Pars petrosa, Mandibel, Femur und Beinmuskel. Kaumuskelproben, die nur für erwachsene Schweine analysiert wurden, weisen ebenfalls eine weite Streuung auf. Jene Organe, die nur für erwachsene Schweine beprobt wurden, variieren allgemein aber am wenigsten mit der höchsten Variabilität in der Leber und der niedrigsten im Herzgewebe. Das Blut streut ebenfalls über einen schmalen Bereich, konnte aber nur für drei der vier erwachsenen Schweine analysiert werden. Die niedrigste Gesamtvariabilität unter den Teilstichproben konnte in den distalen Knochen der Extremitäten gefunden werden: Mittelfußknochen und Phalangen, welche der einzige Knochenprobentyp sind, der nur für erwachsene Schweine analysiert wurde. Die Verteilungsbereiche der Strontiumisotopenverhältnisse innerhalb der Knochenproben nehmen tatsächlich für jeden Knochentyp ab, wenn man die Proben der beiden Ferkel ausschließt: $\Delta = 0.00016$ für die Partes petrosae, 0.00017 für die Mandibulae, 0.00037 für die Femora und insgesamt für alle Knochentypen kombiniert 0.00044 (einschließlich Mittelfußknochen und Phalangen). Mit den Knochen der beiden Ferkel erhöht sich die Bandbreite der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verteilung etwa um den Faktor drei bis zehn, je nach Knochentyp. Dieser Effekt ist in den Fleischproben nicht zu erkennen. Die Kaumuskelproben, welche nur für erwachsene Schweine analysiert werden konnten, zeigen eine noch weitere Verteilung als die Proben der Beinmuskeln, welche für alle sechs Individuen gemessen werden konnten. Darüber hinaus verringert der Ausschluss der Ferkel aus der Beinmuskel-Unterstichprobe deren Variabilität nur geringfügig. Die Zahnschmelzproben haben ähnliche Verteilungsbereiche wie die Knochenproben, aber die verschiedenen Zahnarten unterscheiden sich voneinander, wobei Milchzähne die niedrigsten und dritten Molaren die höchsten Werte aufweisen und jeder Zahntyp für sich eine sehr einheitliche Verteilung aufweist (**Abbildung 27** und **Tabelle 22**). Alle drei Zahnarten haben signifikant unterschiedliche Mittelwerte ($p_{\text{Milchzahn-M1}} = 0.01$, $p_{\text{M1-M3}} = 0.001$, $p_{\text{Milchzahn-M3}} = 6 \cdot 10^{-6}$, T-Test), sowie auch die Zähne der Schweine (M1, M3) verglichen mit denen der Ferkel (Milchzähne) ($p = 0.002$, T-Test). Es zeigt sich also, dass die Zahntypen eine klare Trennung zwischen den Isotopenverhältnissen früherer und späterer mineralisierender Zähne aufweisen. Milchzähne haben die niedrigsten Werte, gefolgt von den ersten Molaren, und die dritten Molaren haben die höchsten Isotopenverhältnisse. In **Tabelle 22** sind alle Zahnschmelzdaten nach ihrem Strontiumisotopenverhältnis in aufsteigender Reihenfolge sortiert.

Ergebnisse (Strontium)

Tabelle 22 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Ergebnisse der untersuchten Zähne, aufsteigend nach Größe (Anders et al. 2018). Wie zu erkennen ist, steigen die Werte mit der fortschreitenden Mineralisationszeit von Milchzähnen bis zu dritten Molaren an.

Zahntyp	Individuum	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2SE%
Milchzahn	1	0.71012	0.00340
Milchzahn	1	0.71017	0.00430
Milchzahn	2	0.71033	0.00290
Milchzahn	1	0.71039	0.00320
Milchzahn	2	0.71060	0.00720
M1	6	0.71060	0.00344
Milchzahn	2	0.71061	0.00390
M1	3	0.71065	0.00329
M1	4	0.71096	0.00219
M1	5	0.71110	0.00383
M3	6	0.71158	0.00212
M3	3	0.71159	0.00239
M3	5	0.71173	0.00267
M3	4	0.71198	0.00412

Die Verteilung der Schweineproben, aufgeteilt nach Gewebetypen ist graphisch in **Abbildung 29** dargestellt. Man erkennt deutlich die Unterschiede zwischen den verschiedenen Zahntypen, sowie die Abweichung der Ferkelknochen von den Knochen der adulten Tiere.

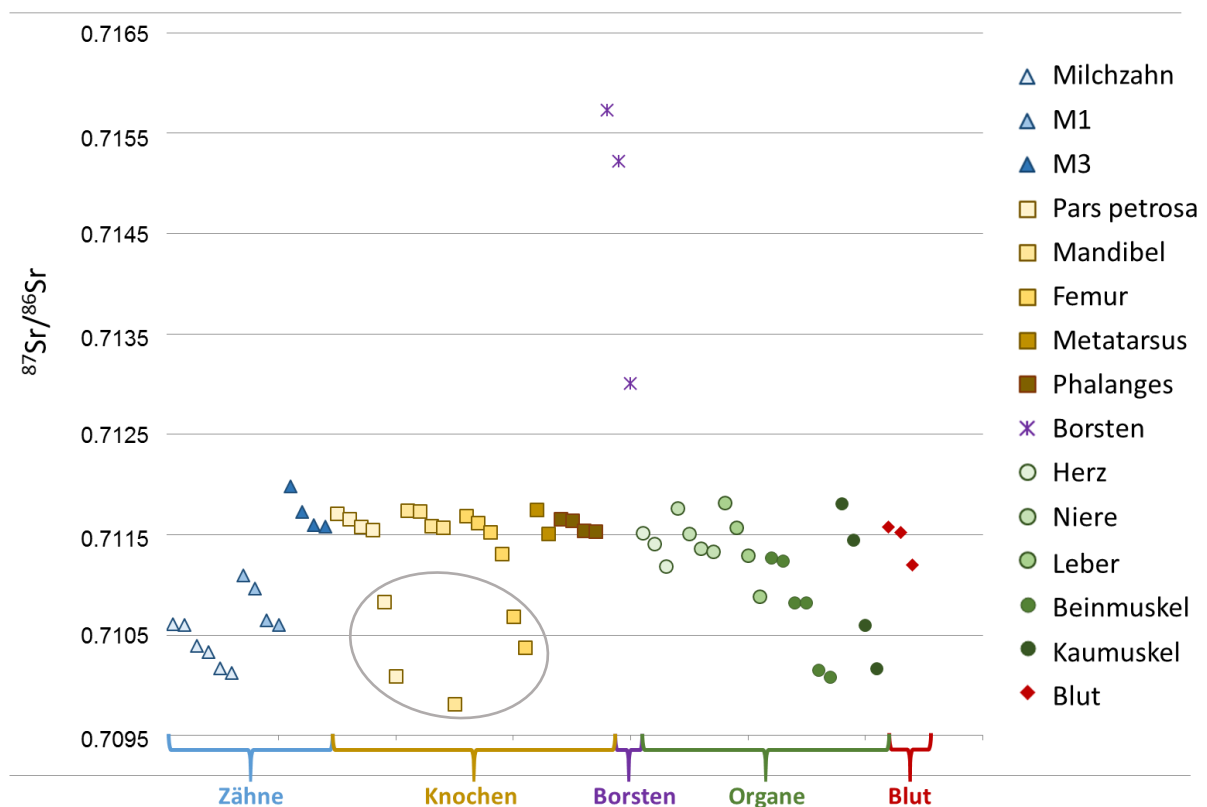


Abbildung 29 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse aller gemessenen Schweineproben einschließlich der für die spätere Auswertung ausgeschlossenen Borstenproben, welche eindeutig erkennbar vom Rest des Datensatzes nach oben hin abweichen. Bei den Zähnen lässt sich erkennen, dass das Isotopenverhältnis mit der späteren Mineralisationszeit von Milchzähnen bis hin zu dritten Molaren ansteigt. Auch die Knochen der Ferkel (grau eingekreist) weisen niedrigere Werte auf, als die der adulten Tiere (Anders et al. 2018).

Ergebnisse (Strontium)

Innerhalb der Schweineproben lässt sich bei den Hartgeweben also ein eindeutiger Trend erkennen: die Proben der Ferkel (1-3 Wochen) unterscheiden sich von jenen der adulten Schweine (> 1 Jahr), mit niedrigeren Isotopenverhältnissen bei den Ferkeln. Bei den Weichgeweben ist hingegen kein solcher Effekt auszumachen.

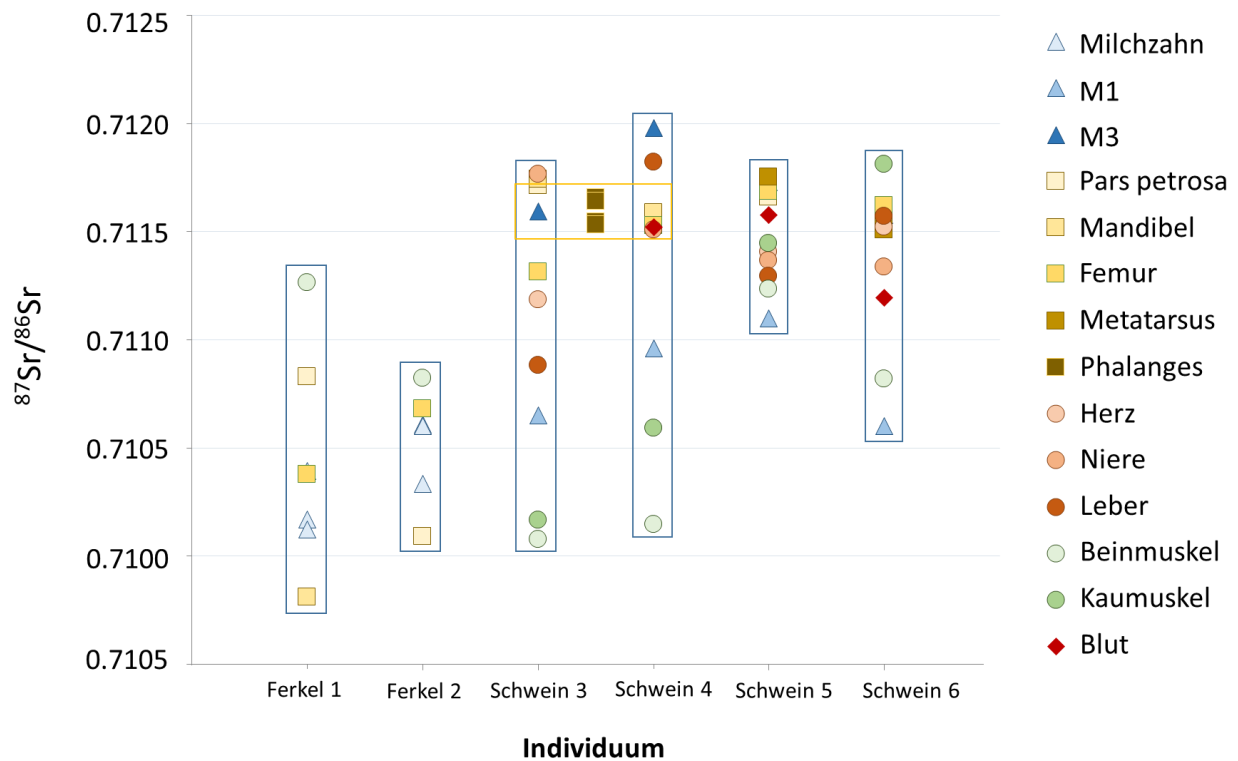


Abbildung 30 Intraindividuelle Verteilung der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse in den verschiedenen Körperbestandteilen (Anders et al. 2018). Die Phalanges-Proben konnten keinem der beiden Individuen 3 oder 4 sicher zugeordnet werden, weswegen sie zwischen den beiden dargestellt sind (orangener Kasten).

Die Daten der einzelnen Ferkel (Individuum 1 und 2) weichen nicht signifikant von einer Normalverteilung ab ($p = 0.7$ bzw. 0.5 , Shapiro-Wilk), die Daten der erwachsenen Schweine (Individuen 3, 4 und 6) ($p = 0.03$, 0.12 und 0.015), mit Ausnahme von Individuum 5 ($p = 0.25$) hingegen schon. Die Variabilität der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse verschiedener Körpergewebe in jedem der sechs untersuchten Individuen ist in **Tabelle 23** dargestellt und in **Abbildung 30** visualisiert. Für die vier Phalanges-Proben kann nur gesagt werden, dass jeweils zwei davon zu Schwein 3 und zu Schwein 4 gehören, aber nicht, welcher Wert genau welchem Individuum zuzuordnen ist, da die Füße der Schweine im Schlachthof versehentlich vermischt wurden. Die niedrigsten Verteilungsbereiche finden sich bei den Individuen 2 und 5, die höchsten bei den Individuen 3 und 4. Der Unterkiefer von Individuum 2 konnte nicht analysiert werden, sowie Blut von Individuum 3 und Herzgewebe von Individuum 4. Sowohl die Herz- als auch die Blutwerte der anderen drei erwachsenen Schweine gehören nicht zu den Extremwerten der intraindividuellen Isotopenverhältnisverteilung, sodass es unwahrscheinlich (aber nicht unmöglich) ist, dass diese unbekannten Verhältnisse die intraindividuelle Variabilität weiter erhöhen würden.

Diskussion (Strontium)

Tabelle 23 Intraindividuelle Variabilität der Strontiumisotopenverhältnisse aller gemessenen Proben (ohne Borstenproben), aufsteigend sortiert von 0.00065 bis 0.00183 (Anders et al. 2018).

	Min	Max	Δ
Ind 5	0.71110	0.71175	0.00065
Ind 2	0.71009	0.71082	0.00073
Ind 6	0.71060	0.71181	0.00121
Ind 1	0.70981	0.71126	0.00145
Ind 3	0.71008	0.71177	0.00169
Ind 4	0.71015	0.71198	0.00183

Die Isotopenverhältnisse der einzelnen Knochentypen unterscheiden sich bei den Ferkeln stark voneinander im Vergleich zu den erwachsenen Schweinen, wo sie sehr eng beieinander liegen, obwohl bei den Schweinen ein zusätzlicher Knochentyp gemessen wurde. Auch die dritten Molaren der erwachsenen Individuen liegen mit ihren $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnissen sehr nahe bei jenen der Knochenproben.

Die Beinmuskelverhältnisse sind die höchsten gemessenen Werte für die Ferkel 1 und 2, die niedrigsten für die Individuen 3 und 4 und unter den niedrigsten Werten für die Individuen 5 und 6, welche einen Monat nach den Individuen 3 und 4 geschlachtet wurden. In den Individuen 3 und 4 liegen die Kaumuskelwerte nahe an den Beinmuskelwerten, während sich in Individuum 6 die beiden deutlich voneinander unterscheiden, wobei der Kaumuskel hier den höchsten Wert darstellt. Die Strontiumisotopenverhältnisse der untersuchten Organgewebe unterscheiden sich bei den beiden zuerst geschlachteten Schweinen (3 und 4) stärker als bei den Individuen 5 und 6.

Tabelle 59 im Anhang führt die Ergebnisse aller durchgeführten $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Einzelmessungen nach Probenkategorie auf.

IV. Diskussion (Strontium)

Für diese Arbeit wurde eine Gruppe nahverwandter, omnivorer Testindividuen, sowie alle relevanten Umgebungsparameter (Boden, Nahrung und Trinkwasser) auf die stabilen Isotopenverhältnisse von Strontium untersucht. Die Tiere stammten alle vom selben Zuchtbetrieb mit einem regionalen, aber vielseitigen Nahrungsangebot. Es ist daher nicht abwegig anzunehmen, dass die so erhobenen $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Daten der mindestens zu erwartenden lokalen Variabilität eines modernen (aber biologisch geführten) landwirtschaftlichen Schweinemastbetriebs entsprechen. Somit können die hier generierten Daten als Referenz für die minimal zu erwartende Verteilung von stabilen Strontiumisotopenverhältnissen in einem entsprechenden landwirtschaftlichen Rahmen gesehen werden.

Im Zuge dieser Diskussion werden parallel zu den $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Daten auch die zugehörigen Strontiumkonzentrationen diskutiert. Die Kenntnis der jeweiligen Strontiumkonzentrationen der verschiedenen Probenotypen hilft dabei, die Mechanismen besser zu verstehen, wie sich Strontium und seine stabilen Isotope auf ihrem Weg durch die Trophieebenen vom Boden bis hin zu pflanzlichen und tierischen Geweben verteilen. Allerdings ist dabei zu beachten, dass Konzentrationen sich durch Biopurifikation, oder aber auch durch Akkumulation beim Übergang von einer Trophiestufe zur nächsten eklatant ändern können.

Während verschiedene Probentypen derselben Trophieebene, also zum Beispiel verschiedene pflanzliche Futterkomponenten oder die verschiedenen Körpergewebe der Schweine, direkt miteinander verglichen werden können, gilt dies nicht für den Vergleich von Proben verschiedener Trophiestufen, wie zum Beispiel beim Vergleich von Körpergewebe und konsumierter Nahrung (Graustein 1989, Capo et al. 1998, Beard & Johnson 2000, Blum et al. 2000, Faure & Powell 2012, Flockhart et al. 2015). So kann gegen Strontium in bestimmten Geweben oder Organismen stark diskriminiert werden, oder bestimmte Gewebe (wie zum Beispiel mineralisierte Hartgewebe) akkumulieren Strontium in erheblichem Ausmaß. Dadurch kann die Strontiumkonzentration in bestimmten Körperbestandteilen des Konsumenten deutlich niedriger, oder auch deutlich höher sein, als die der aufgenommenen Nahrungsbestandteile (Eisenberg & Gordan 1961, Loutit 1961, Elias et al. 1982). Die in dieser Studie ermittelten Konzentrationen an Strontium in den verschiedenen Probentypen passen größtenteils recht gut zu entsprechenden Vergleichswerten aus der Literatur. In den einzelnen Unterkapiteln wird hierauf näher eingegangen.

A. Bodenproben

Das nordöstliche Bayern, und somit die Region, in welcher der Versuchshof liegt, ist geologisch gesehen von Granit und Gneis geprägt, wodurch hier $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werte von über 0.71 zu erwarten sind (Grupe et al. 1997). Tatsächlich liegen alle für diese Arbeit untersuchten Bodenproben über diesem Wert. Allerdings weisen die hier gemessenen Bodenauszüge eine erstaunlich hohe Streuung und Variabilität der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse auf, obwohl sämtliche Bodenproben in einem Umkreis von weniger als zwei Kilometern um den Versuchshof herum gesammelt wurden. Die Mittelwerte von Boden- und sonstigen Proben sind signifikant verschieden voneinander und es kommt zu keiner Überschneidung mit den Schweine- und nur zu minimaler Überschneidung mit den Nahrungsproben.

Das ist insofern überraschend, als die Bodenproben direkt von den Weideflächen stammten, auf denen die Schweine grasten und wühlten, bzw. von den Feldern auf denen das Futter der Tiere angebaut wurde. Es wäre daher eigentlich zu erwarten gewesen, dass die von den Schweinen konsumierte Nahrung (und damit indirekt auch die Schweine selbst) isotopisch stark von diesen Bodenverhältnissen beeinflusst wurde. In der Literatur finden sich allerdings auch bereits andere Studien, in denen die $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Daten von Boden und Organik ebenfalls nicht miteinander übereinstimmen (Crittenden et al. 2007). Es gibt mehrere mögliche Faktoren, welche diese unerwarteten Unterschiede zwischen Bodenlösungen und den übrigen Proben erklären könnten. Eine natürliche Ursache könnte beispielsweise darin liegen, dass die Mehrzahl der hier untersuchten und gefütterten Pflanzenarten in ihren Strontiumisotopenverhältnissen vorrangig nicht vom Boden und der zugrundeliegenden Geologie, sondern vom Niederschlagswasser abhängen, welches niedrigere $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werte von ca. 0.7092, aber eben auch sehr geringe Strontiumkonzentrationen aufweist (Åberg 1995, Capo et al. 1998).

Derartige Fälle, in denen der atmosphärische Strontiumeintrag über den geologischen dominiert, wurden bereits in früheren Studien publiziert, gelten allgemein jedoch eher als selten und unüblich (Gosz et al. 1983, Price et al. 2002). Eine eventuell plausiblere Erklärung findet sich möglicherweise in der Extraktionsmethode, die in dieser Studie für die Bodenproben verwendet wurde. Die Methode zur Herstellung der Bodenauszüge hatte das Ziel, natürliche Verwitterungs- und Herauslöseprozesse experimentell zu imitieren, um auf diese Weise das bioverfügbare Strontium aus den Proben zu gewinnen. Die durchgeführten Schritte könnten zu aggressiv gewesen sein, und somit eine andere als nur die bioverfügbare Strontiumfraktion aus den Proben gelöst haben. Bei den starken Diskrepanzen, die zwischen den $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Daten der Bodenproben und den organischen Proben bestehen, erscheint

es in der Tat plausibel, dass im Labor mehr Strontium aus dem Boden herausgelöst wurde, als unter natürlichen Bedingungen. Die hier gemessenen Bodenwerte repräsentieren also aller Wahrscheinlichkeit nach nicht die bioverfügbare Fraktion des im Boden enthaltenen Strontiums, weswegen es zu einer so starken Diskrepanz zwischen den Isotopenverhältnissen der Boden- und der organischen Proben kommt.

Eine mögliche Erklärung für die starke Streuung und die großen Unterschiede zwischen den einzelnen Bodenproben, sind potentielle anthropogene Einflüsse, wie Düngemittel oder Staub (Hurst & Davis 1981, Åberg et al. 1989, Probst et al. 2000). Künstliche Dünger werden auf dem Versuchshof allerdings nicht eingesetzt und der Betrieb liegt sehr abgelegen, fernab von möglichen industriellen Einflüssen und anderen, nicht-biologisch bewirtschafteten Agrarflächen. Selbst falls derartige Faktoren einen Einfluss hätten, wären die Futterpflanzen ihnen gleichermaßen ausgesetzt und würden das Strontium aus diesen Quellen ebenfalls absorbieren. Deswegen wären in einem solchen Falle größere Überschneidungen zwischen Boden- und Futterproben zu erwarten.

Aus einem Gramm Bodenprobe konnten mit der angewandten Methode zwischen 6.4 und 14.0 µg Strontium gelöst werden. Diese Konzentrationen liegen ungefähr im Rahmen der von Capo et al. (1998) angegebenen typischen Konzentrationen von Strontium im Boden. Böden können sich demnach stark in der Menge des enthaltenen (und löslichen Strontiums) stark unterscheiden (zwischen 10 und 1000 ppm). Im Vergleich dazu waren die hier untersuchten Bodenproben recht einheitlich in der Variabilität ihrer Strontiumkonzentrationen. Die Konzentrationen pflanzenverfügbaren Strontiums werden in der Literatur eher mit niedrigeren Werten (um die 0.22 ppm) als den hier gemessenen angegeben (Åberg et al. 1990, Capo et al. 1998, Bentley 2006). Auch das spricht dafür, dass die verwendete Methode wahrscheinlich nicht dasjenige Strontium aus den Proben löste, welches auf dem Feld auch den Futterpflanzen zur Verfügung stand. Es ist zu erwähnen, dass in der Literatur auch andere (weniger aggressive) Extraktionsmethoden für bioverfügbares Strontium aus Boden- und Gesteinsproben existieren, welche möglicherweise für die hier untersuchten Proben besser geeignet gewesen wären (z.B. Maurer et al. 2012, Pate & Hutton 1988, Bullen & Bailey 2005). Diese zu testen war jedoch im Umfang dieser Arbeit nicht möglich, empfiehlt sich aber für künftige Studien.

Betrachtet man die hohe Variabilität von $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in den Bodenproben an dem hier untersuchten Standort näher, so darf nicht außer Acht gelassen werden, dass derartig große Bandbreiten bei der Verteilung von Bodenwerten auch in anderen Studien gefunden wurden (Sillen et al. 1998, Price et al. 2002). Sie zeigen, dass Gesteine und Böden im Vergleich zu organischen Proben desselben Ortes extrem variabel in ihrer strontiumisotopischen Zusammensetzung sind und dass diese Variabilität von Pflanzen auf einen geringeren Verteilungsbereich eingeengt und die Variabilität der Pflanzen schließlich wiederum noch weiter durch die entsprechenden Endkonsumenten verringert wird, die einen erstaunlich einheitlichen Mittelwert der verschiedenen relevanten Einflüsse ihrer Umgebung abbilden. Dieser Effekt wird in einigen Arbeiten als Biopurifikation der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werte bezeichnet (Chamberlain et al. 1996, Blum et al. 2000, Bentley 2006, Burton & Price 2013). In den hier erhobenen Daten lässt sich dasselbe Muster erkennen: Die Bodenauszüge weisen bei weitem die höchste Variabilität auf (wenn sie auch nicht die bioverfügbare Fraktion widerspiegeln, welche sowohl in ihrer Verteilung als auch ihrer Variabilität näher an den Futterpflanzen liegen sollte), gefolgt von einer geringeren Streuung bei den Nahrungsproben und der eindeutig geringsten Bandbreite bei den $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werten der Schweine. Tatsächlich scheint es so, als würden die Schweine in den $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Daten ihrer Körpergewebe ein sehr einheitliches Mittel der verschiedenen konsumierten Nahrungsinputs (diverse Futterquellen und Trinkwasser) abbilden (siehe **Abbildung 26**).

B. Wasser

Wasser wurde von zwei unterschiedlichen Quellen beprobt und gemessen (Quellwasser und Leitungswasser). Wie sich zeigte wiesen beide zwar ähnliche, aber voneinander unterscheidbare $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verteilungen auf. Glücklicherweise wurde aber über die gesamte Dauer des Experiments nur das Quellwasser als Trinkwasser für die untersuchten Schweine verwendet. Dieses tatsächlich konsumierte Trinkwasser variierte bezüglich $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, wie auch bezüglich der Strontiumkonzentration nur sehr wenig und kann deswegen als nahezu konstanter Inputfaktor von Strontium angesehen werden. Außerdem waren die im Wasser gefundenen Mengen an Strontium vergleichsweise sehr gering, weswegen anzunehmen ist, dass der Einfluss des Trinkwassers auf die $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Komposition der Schweinegewebe konstant und moderat ist, obwohl Trinkwasser in sehr hohen Mengen von den Individuen konsumiert wurde. Die in den Wasserproben gefundenen Strontiumkonzentrationen von 0.03 bis 0.14 ppm decken sich gut mit vergleichbaren Angaben aus der Literatur. Schroeder et al. (1972) fanden in den von ihnen untersuchten Trinkwasserproben Strontiumkonzentrationen von 0.01 bis 0.38 ppm mit einem Mittelwert von etwa 0.1 ppm. Alle hier ermittelten Werte fallen in diesen Rahmen. Während Niederschlagswasser in der Regel geringere Konzentrationen von nur etwa 1-2 ppb aufweist, passen diese Werte eher zu Grund- und Oberflächenwasser, was sich mit der Tatsache deckt, dass das hier untersuchte Trinkwasser aus einer lokalen unterirdischen Quelle stammte (Capo et al. 1998). Die ermittelten Strontiumkonzentrationen im Trinkwasser erscheinen also plausibel und zeigen die zu erwartenden niedrigen Werte.

Nichtsdestotrotz ist Trinkwasser eine wichtige Inputgröße für wachsende Schweine und sollte als Einflussfaktor nicht unterschätzt werden. Dies gilt vor allem in Situationen, in denen die $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werte des Wassers nicht wie hier über die Zeit hinweg konstant sind (Brooks & Carpenter 1990, Mroz et al. 1995). Doch selbst wenn wie hier das Trinkwasser bezüglich Konzentration und Isotopie von Strontium über die Lebenszeit der Konsumenten konstant bleibt, können Faktoren wie Alter bzw. Wachstum, Wassergehalt und Typ der Nahrung, Aktivität, Temperatur (und demnach auch Jahreszeit bzw. Wetterverhältnisse) etc. die Menge des von den Schweinen getrunkenen Wassers beeinflussen und somit zu Variationen im Strontiuminput durch das Wasser führen (Gill 1989, Mroz et al. 1995). Es war im Zuge des hier vorgestellten Experimentes nicht möglich die tatsächlichen Mengen des von den Tieren konsumierten Trinkwassers festzuhalten. Angesichts der sehr geringen Strontiumkonzentrationen, wird aber dennoch ohnehin angenommen, dass dem Futter die bei weitem größere Bedeutung für die Strontiumisotopenverhältnisse der tierischen Gewebe zukommt. Diese Annahme wird durch eine aktuelle Studie von Lewis et al. (2017) gestützt, laut welcher Trinkwasser nur für 1.2 % (bis maximal 5 %) des Strontiums in Hausschweinen verantwortlich ist. Der Vergleich der Schweinedaten mit den Wasser- und Futterdaten zeigt in der Tat, dass die Isotopenverhältnisse der Schweine näher an jenen der Futterproben liegen als am Trinkwasser (siehe **Abbildung 27**).

C. Futter

Von allen Futtertypen waren Gras und Silage (also das Niedrigenergiefutter) diejenigen, die ihren Ursprung in unmittelbarer Nähe zum Versuchshof hatten, also gewissermaßen am lokalsten angebaut wurden bzw. wuchsen (Gras: maximal 3 km, Silage: maximal 8 km). Es ist daher auch nicht verwunderlich, dass beim Niedrigenergiefutter die höchsten $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse vorkommen und damit von allen untersuchten Futtermitteln die größte isotopische Ähnlichkeit zu Quellwasser und Bodenproben besteht. Obwohl das Gras direkt vor Ort wuchs und von allen Futtertypen den lokalsten Bedingungen ausgesetzt war, zeigt es in seinen Strontiumisotopenverhältnissen eine extrem hohe

Variabilität. Diese Vielfalt könnte möglicherweise die Variabilität der zugrundeliegenden Böden widerspiegeln, auf welchen das Gras wuchs. Außerdem könnte der Einfluss des Niederschlagswassers (welches ein relativ konstantes $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis von ca. 0.7092 aufweisen sollte) je nachdem wann und wo das entsprechende Gras gewachsen ist, variieren und somit zu unterschiedlichen $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werten in den verschiedenen Grasproben geführt haben (Capo et al. 1998). In jedem Fall ist die lokale Variation dieses einen Futtertyps, der aus einem Umkreis von maximal zwei Kilometern stammte, beachtlich. Gras und Silage wiesen von allen Futtertypen mit 4.7 bzw. 12.5 ppm die höchsten Strontiumkonzentrationen auf (was vermutlich auf den hohen Mineralanteil im Gras zurückzuführen ist) und sind daher als entscheidender Faktor für die Zusammensetzung der Körpergewebe anzusehen. Das aus Gras und Silage bestehende Niedrigenergiefutter wurde über die Lebenszeit der Testindividuen in unterschiedlichen Mengen konsumiert, was aufgrund der hohen Strontiumkonzentrationen in dieser Futterkategorie auch zu signifikanten Veränderungen der isotopischen Komposition der Körperbestandteile geführt haben kann. Dieser Futterwechsel kann so zu den beobachteten Unterschieden zwischen verschiedenen Schweineproben von Geweben mit unterschiedlichen Bildungszeiträumen und Turnoverraten und zwischen den verschiedenen Altersklassen beigetragen haben.

Die Strontiumkonzentration von etwa 2 ppm, welche im gefütterten Brot festgestellt wurde liegt etwas niedriger als Vergleichswerte von Wünschmann et al. (2004) (3.59-7.70 ppm). Brot ist jedoch ein sehr variables Produkt und kann sich je nach Herkunft und Zubereitungsart auch in seiner chemischen Zusammensetzung unterscheiden. Somit ist eine Strontiumkonzentration im selben Größenordnungsbereich wie hier gemessen, durchaus mit den Werten von Wünschmann et al. vergleichbar. Die Mischung aus Brot und Molke, die den Schweinen zu einem relativ konstanten Anteil von weniger als 10 % verfüttert wurde, weist im Allgemeinen niedrigere $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werte auf als das Niedrigenergiefutter und eine Konzentration von 1.1 ppm. Die Strontiumisotopenzusammensetzung dieser Mischung wird hauptsächlich durch das Brot und nicht durch die Molke bestimmt, die im Vergleich zum Brot extrem niedrige Strontiumkonzentrationen von nur ca. 0.1 ppm aufweist, was zu den für Milch und Milchanteile zu erwartenden Werten anderer Arten aus der Literatur passt (Kuhmilch: 0.01-0.45 ppm; Muttermilch: 0.03-0.04 ppm) (Schroeder et al. 1972, Rossipal & Krachler 1998, Wünschmann et al. 2004). Grund für die niedrigen Konzentrationen in der Molke ist vermutlich die Tatsache, dass die Milchdrüsen der Kühe gegen Strontium diskriminieren und deswegen die Milch an Strontium abgereichert wird, obwohl sie reich an Calcium ist. Es wurde also aufgrund der immensen Konzentrationsunterschiede zwischen Brot und Molke angenommen, dass das $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis der Brot-Molke-Mischung fast nur vom Brot bestimmt wird, obwohl Molke deutlich höhere Strontiumisotopenverhältnisse aufweist (was möglicherweise daran liegt, dass auch die Kühe von denen die Molke stammte, lokales Gras gefressen hatten, s.o.). Dies bestätigt sich in der Tatsache, dass die $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse der gemessenen Brot-Molke-Mischung jenen der gemessenen Brotproben deutlich ähnlicher sind, als jenen der gemessenen Molkeproben.

Ein ähnlicher Effekt tritt bei der Getreidemischung auf. Hier beeinflusst ein in kleinen Mengen von nur 1-3 % beigemengter Zusatz die Strontiumzusammensetzung der gesamten Mischung stark. Mineralfuttermittel, das vergleichsweise große Mengen an Strontium (mehr als das 30-fache der Konzentration der Getreidekörner) enthält, scheint für das endgültige Strontiumisotopenverhältnis mindestens genauso wichtig zu sein wie alle anderen Komponenten zusammen. Dies in Verbindung mit der Tatsache, dass das Getreide teilweise aus größeren Entfernungen innerhalb der geografischen Region bezogen wurde (Weizen: 3-14 km, Hafer: 8-43 km, Roggen: 8-30 km, Hülsenfrüchte: 20-75 km) könnte erklären, warum die Getreidemischung die niedrigsten (und damit am stärksten von lokalem Wasser und Boden abweichenden) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werte aufweist: Mineralfutter ist ein Futterergänzungsmittel, welches einen großen Einfluss hat, aber sehr wahrscheinlich kein lokales Strontiumisotopensignal aufweist. Literaturangaben zu Strontiumkonzentrationen von Hafer, Weizen

und Buchweizen (welche alle auch in der Getreidemischung enthalten waren) von Schroeder et al. (1972) liegen deutlich niedriger, als die entsprechenden Werte aus dieser Studie. Das kann zum einen daran liegen, dass in diesem Experiment die vollen Körner an die Schweine verfüttert wurden, während der Verarbeitungsgrad bei Schroeder et. al unbekannt ist. Zum anderen hängt die Strontiumkonzentration einer Pflanze auch immer von den Mengen an Strontium ab, die sich im lokalen Boden befinden.

Die $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werte der Kartoffeln ähneln dem übrigen Hochenergiefutter. Sie sind also ebenfalls niedriger als die des Niedrigenergiefutters. Auch die Kartoffeln wurden aus einem vergleichsweise großen Umkreis bezogen, sind also gewissermaßen weniger lokal, als das Gras und die Silage. Die Kartoffelproben weisen deutlich niedrigere Strontiumkonzentrationen auf, als die Getreidemischung, weswegen davon auszugehen ist, dass das Getreide hier einen relativ gesehen größeren Beitrag zum Strontiuminput in die Versuchstiere über das Hochenergiefutter leistet.

D. Schweine

1. Begründung für den Ausschluss der Borstenproben

Wie in **Abbildung 29** und den Kernel-Density-Graphen in **Abbildung 28** zu sehen ist, unterscheiden sich die gemessenen $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse der untersuchten Borsten deutlich vom Rest des Datensatzes sowie auch voneinander. Die Unterschiede sind so ausgeprägt, dass eine metabolische oder ernährungsbedingte Erklärung unwahrscheinlich erscheint. Wie in vorangegangenen Kapiteln beschrieben, können die geologischen Strontiumisotopenverhältnisse wesentlich variabler sein als die Verhältnisse entsprechender biogener Proben vom gleichen Standort und extremere Werte erreichen als das bioverfügbare Strontium, was sich auch in den hier gemessenen Bodenlösungen gezeigt hat (siehe **Abbildung 26**). Daher ist anzunehmen, dass das in den Borstenproben gemessene Strontium wohl mehrheitlich nicht die endogenen, also körperinternen Strontiumbedingungen widerspiegelt. Dafür spricht auch die Tatsache, dass in den Haarproben relativ hohe Konzentrationen an Strontium gefunden wurden (1.75-2.60 ppm) wenn man sie beispielsweise mit den Werten von Scheid (2011) (welche allerdings an menschlichem Haar erhoben wurden) vergleicht (0.04-0.25 ppm, MW = 0.14 ppm).

Strontium im Haar stammt aus zwei verschiedenen Quellen: Internes oder endogenes Strontium wird bei metabolischen Wachstumsprozessen des Haarfollikels eingebaut und spiegelt somit den inneren Strontiumpool des Körpers wider, der aus den Nahrungsinputs (Futter und Trinkwasser) besteht. Externes oder exogenes Strontium stammt aus äußeren Quellen der umgebenden Umwelt, einschließlich atmosphärischer Faktoren und dem Boden (Tipple et al. 2013). Dieses exogene Strontium muss erfolgreich entfernt werden, wenn man Rückschlüsse auf die strontiumisotopenrelevanten Vorgänge im Körper ziehen möchte. Die Entfernung der exogenen Verunreinigungen im Haar hat sich als schwierig erwiesen (Kempson & Skinner 2012). Tipple et al. (2013) testeten fünf verschiedene Reinigungsmethoden, um internes und externes Strontium voneinander zu trennen. Für ihr Experiment wurde Echthaar aus einem Friseurladen verwendet. Mögliche Quellen und Mengen der externen Kontamination mit exogenem Strontium waren unbekannt. Sie fanden heraus, dass die Reinigung mit 0.1 M HCl am besten geeignet ist, um exogenes Strontium zu entfernen, erwähnten aber auch, dass weitere Kontrollstudien erforderlich sind, um diese Schlussfolgerung zu bestätigen. Für diese Studie wurde sich an das Reinigungsverfahren von Tipple et al. gehalten. Anscheinend konnte die 0.1 M HCl-Methode nicht wie erwartet das gesamte exogene

Strontium aus den Borsten entfernen. Deshalb wurden die $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Isotopenverhältnisse der Borsten nicht in die weitere Interpretation einbezogen und auch in den meisten Graphen, Tabellen und statistischen Tests ausgeklammert.

Mögliche Erklärungen für das erfolglose Reinigungsverfahren könnten sein, dass sich 1) Schweineborsten anatomisch oder chemisch so vom menschlichen Haar unterscheiden, dass sie das äußere Strontium stärker binden, oder 2) die hier untersuchten Borsten eine viel größere Menge an Fremdkontamination enthielten, da es sich um Schweine handelt, die sich im Gegensatz zu Menschen stärker im ständigen Kontakt mit der Außenwelt befinden (z.B. Schlammsohlen). Hier sind also weitere experimentelle Studien nötig, um entsprechende Reinigungsmethoden für die Strontiumisotopenanalyse an stark kontaminierten Haarproben verschiedener Tierarten zu etablieren. Im Rahmen dieser Arbeit war es nicht möglich die dafür nötigen kontrollierten Bedingungen zu schaffen.

2. Konzentrationen

Für Knochen werden in der Literatur Strontiumkonzentrationen zwischen 40 und 1000 ppm angegeben. Zahnschmelz weist in der Regel etwas niedrigere Werte auf, als der zugehörige Knochen, da die entsprechenden Zähne oft während der Schwangerschaft und Stillzeit mineralisieren und in dieser Zeit aufgrund von Diskriminierungsprozessen in Plazenta und Milchdrüsen weniger Strontium in den Körper gelangt, wohingegen Knochen kontinuierlichem Remodeling unterworfen ist und somit bei älteren Individuen auch Strontium aus der nicht-abgereicherten Nahrung inkorporiert (Bryant et al. 1958, Bryant & Loutit 1964, Rosenthal 1981, Grupe et al. 1997, Schweissing & Grupe 2003). Die hier ermittelten Strontiumkonzentrationen passen zu diesen Angaben. Die Knochen befinden sich mit Konzentrationen zwischen 86.9 und 94.8 ppm im zu erwartenden Bereich und im Zahnschmelz wurden niedrigere Konzentrationen von 54.3-56.6 ppm gemessen. Auch die hier ermittelten sehr geringen Strontiumkonzentrationen in den Weichgewebeproben erscheinen anhand von vergleichbaren Daten aus der Literatur plausibel. Schroeder et al. (1972) untersuchte unter anderem auch verschiedene Weichgewebe (verschiedene Muskelgewebe (auch vom Schwein), Herz, Leber und Niere) auf ihre Strontiumkonzentration und kam zu Werten zwischen 0.01 und 0.07 ppm, je nach Gewebetyp und Tierart. Alle für diese Arbeit gemessenen Weichgewebeproben fallen mit ihren Strontiumkonzentrationen in diesen Bereich, mit Konzentrationen zwischen 0.01 und 0.05 ppm. Wie bei Schroeder et al. (1972) finden sich auch hier die niedrigsten Werte in Herz und Leber.

Die an den Testschweinen erhobenen Konzentrationsdaten für Strontium in Hart- und Weichgeweben passen also perfekt zu den Vergleichswerten aus der Literatur. Innerhalb der Schweineproben finden sich die höchsten Strontiumkonzentrationen erwartungsgemäß in den mineralisierten Hartgeweben (Zahnschmelz und Knochen) und nur sehr geringe Mengen an Strontium in den Weichgeweben und im Blut (Bentley 2006). Grund hierfür ist die Tatsache, dass Strontium sich in biologischen Prozessen ähnlich wie Calcium verhält. Von der im Körper befindlichen Menge beider Elemente befindet sich nur ein Bruchteil in den Weichgeweben, während 99 % des Strontiums (und Calciums) im Apatit des Skelettgewebes gespeichert werden (Schroeder et al. 1972, Blum et al. 2000, Dahl et al. 2001). Hinzu kommt, dass beim Eintritt in den Blutkreislauf gegen Strontium diskriminiert wird und Strontium in den Nieren bevorzugt ausgeschieden wird, was dazu führt, dass die Strontiumkonzentrationen der Weichgewebe sogar noch geringer sind, als die des Trinkwassers (MacDonald et al. 1956, Bryant & Loutit 1964, Elias et al. 1982, Sillen & Kavanagh 1982, Burton et al. 2003). Sowohl für Menschen als auch für Schweine wurde eine Altersabhängigkeit der Effizienz der Diskriminierung von Strontium gegenüber Calcium nachgewiesen, wobei die Diskriminierung in jungen Individuen geringer ausgeprägt ist, als in älteren und ausgewachsenen (McClellan 1964). Es ist allerdings schwer abzuschätzen,

inwieweit sich in besonders jungen Individuen die Diskriminierungseffekte von Plazenta und Milchdrüsen auf der einen Seite und der verminderten Diskriminierung im subadulten Körper auf der anderen, gegenseitig aufheben. Hierfür wären weitere Studien nötig, die sich stärker auf die Untersuchung von Strontiumkonzentrationen in unterschiedlich alten Individuen fokussieren.

3. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

Die Schweineproben stammten von insgesamt sechs nah verwandten Individuen (Geschwister), die zur selben Zeit geboren und über denselben Zeitraum unter den gleichen Bedingungen aufgezogen wurden. Das Trinkwasser blieb, wie oben diskutiert, in seiner Konzentration und Strontiumisotopie konstant und stammte aus einer lokalen Quelle. Das Futter wurde größtenteils lokal bzw. regional angebaut. Es ist von daher für die Verteilung der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werte in den Schweineproben davon auszugehen, dass diese einen so lokalen Rahmen (und damit eine so minimale Variabilität) abbilden, wie es ohne Laborbedingungen in modernem Kontext möglich ist.

a) *Vergleich mit gängigen Grenz- und Richtwerten*

In verschiedenen Publikationen wurden Grenzwertbereiche zur Bestimmung lokal zu erwartender Verteilungsmuster, sowohl für die inter- als auch für die intraindividuelle strontiumisotopische Variabilität vorgeschlagen. Da diese Arbeiten größtenteils aus dem archäologischen Kontext stammen, beziehen und beschränken sich die Grenzwertdefinitionen meistens auf die mineralisierten Hartgewebe (Knochen und Zähne). Studien aus der Forstwirtschaft wird meist eher auf die Stoffkreisläufe im Ökosystem, als die lokal zu erwartenden Isotopenverhältnisse eingegangen (Gosz et al. 1983, Rundel 1988, Blum et al. 2000).

(1) Intraindividuelle Variabilität

Grupe et al. (1997), Schweissing & Grupe (2003) und Price et al. (2004) verwendeten einen intraindividuellen Cut-off-Wert von $\Delta = 0.001$ (Differenz zwischen Zahnschmelz- und Knochen- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) um unterschiedliche Datenpopulationen voneinander zu unterscheiden. Die Schätzung bzw. Definition dieser Studien basiert auf den biogeochemischen Gegebenheiten derjenigen bayerischen Region, in der auch die Schweine in dieser Studie geboren und aufgezogen wurden (Schweissing & Grupe 2003). Knudson et al. (2016) fanden heraus, dass Unterschiede in der dritten Dezimalstelle zwischen Zahnschmelzproben auf Variabilität hinweisen und zur Definition lokaler Grenzwertbereiche verwendet werden können, was ebenfalls zu einem Bereich von $\Delta = 0.001$ führt. Hierbei wurde die Grenze durch den Vergleich von $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnissen verschiedener und gleicher Zahntypen innerhalb prähistorischer Individuen definiert.

Die höchste intraindividuelle Gesamtvariabilität im hier untersuchten Schweineproben-Datensatz beträgt 0.00183 (Individuum 4), was fast doppelt so hoch ist wie die von den im vorherigen Absatz genannten Autoren vorgeschlagenen Cut-offs. Im Mittel betrug der intraindividuelle Verteilungsbereich 0.0013 ± 0.0005 (1σ), wobei hier die Weichgewebe miteinbezogen werden, was bei den anderen genannten archäologischen Studien nicht der Fall war. Betrachtet man nur Zähne und Knochen, reicht die intraindividuelle Variabilität von minimal 0.00059 in Individuum 2 bis zu maximal

0.00109 in Individuum 3 mit einem Mittelwert von 0.0009 ± 0.0002 (1σ). Die Mandibel konnte für Individuum 2 nicht gemessen werden, und da dieser Probenotyp in Individuum 1 (dem jüngsten, eine Woche alten Ferkel) den niedrigsten $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Wert darstellt, ist es möglich, dass die intraindividuelle Variabilität des mineralisierten Gewebes für dieses Individuum unterschätzt werden könnte. Vergleicht man die hier beobachteten Verteilungsbereiche mit den Cut-offs aus der Literatur, scheinen die Daten zumindest für die Hartgewebe verhältnismäßig gut zu den publizierten Grenzwertbereichen zu passen.

Im Durchschnitt liegen die Bandbreiten sowohl mit als auch ohne die Daten der Weichgewebe nah an dem mathematischen Richtwert von 0.001. Individuum 4 übersteigt diese Grenze allerdings fast um den Faktor zwei, wenn die Weichgewebe miteinbezogen werden. Individuum 3 liegt sogar selbst dann leicht über der 0.001-Grenze, wenn nur mineralisierte Gewebe berücksichtigt werden. Es muss hierbei bedacht werden, dass der Cut-off-Wert von 0.001 für unterschiedliche Datenpopulationen anhand von archäologischem Material bestimmt wurde. Der Richtwert gilt also für lange Zeiträume und alle potentiellen Veränderungen, die in dieser Zeit stattfinden und zur Variabilität der lokalen $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse beitragen können. Die hier untersuchten Tiere waren sehr eng miteinander verwandt und wurden zur gleichen Zeit unter gleichen Bedingungen geboren und aufgezogen. Der Untersuchungszeitraum beschränkt sich also nicht auf mehrere Jahre, sondern nur auf wenige Monate. Bei solch kontrollierten und einheitlichen Bedingungen wäre eigentlich eine vergleichsweise einheitliche Verteilung der Werte zu erwarten. Deshalb stellen selbst Verteilungsbereiche, welche die Grenze von 0.001 auch nur erreichen oder leicht übersteigen, eine unerwartet hohe Variabilität dar.

(2) Interindividuelle Variabilität

Burton & Price (2013) postulieren, dass die $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werte lokaler menschlicher oder tierischer Populationen typischerweise weniger als ± 0.0003 variieren. Dieser Grenzwertbereich von $\Delta = 0.0006$ basiert ausschließlich auf Zahnschmelzdaten. Er ist offensichtlich sogar noch geringer, als der zuvor erwähnte Cut-off der anderen Autoren für die intraindividuelle Variabilität. Die gesamte interindividuelle Bandbreite der hier untersuchten Schweineproben (inklusive aller Gewebetypen) von $\Delta = 0.00217$ übersteigt diesen Wert um ein Vielfaches. Betrachtet man ausschließlich den Zahnschmelz, so wird die Grenze von 0.0006 von keinem der Zahntypen überschritten, wenn diese getrennt voneinander untersucht werden. Nimmt man jedoch alle drei Zahntypen zusammen, so ist die Variabilität der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Daten mit $\Delta = 0.00186$ ebenfalls deutlich höher als das postulierte Limit von 0.0006 (siehe **Tabelle 21**). Werden die Knochenproben mit dem Grenzwert von Burton & Price (2013) verglichen, so macht es keinen Unterschied, ob man die Knochentypen getrennt voneinander betrachtet, oder alle zusammen: die Grenze von 0.0006 wird immer eindeutig überschritten. Dasselbe gilt für die Fleischproben. Für die hier untersuchten Daten ist der von Burton & Price (2013) vorgeschlagene empirische Grenzwert also deutlich zu eng gefasst.

Wenn unterschiedliche Datenpopulationen als verschiedene Herkunftsorte interpretiert werden, so könnte es mit den hier vorgestellten Methoden zum Ausschluss einzelner Datenpunkte als nicht-lokal kommen, was zu Fehlinterpretationen der hier generierten Datensätze führen würde, sowohl bezüglich der intraindividuellen, als auch der interindividuellen Variabilität. Dies gilt nicht nur, wenn man die Weichgewebe miteinbezieht, sondern auch wenn lediglich die mineralisierten Hartgewebe betrachtet werden. Obwohl alle untersuchten Individuen nachweislich ihr gesamtes Leben am selben Ort verbrachten, würden mit den geprüften Methoden möglicherweise nicht alle von ihnen untersuchten Proben als permanent lokal definiert werden.

b) Potentielle moderne Einflüsse

Es gibt mehrere mögliche Aspekte, die diese Beobachtungen potentiell erklären könnten. Zunächst muss festgehalten werden, dass sich die modernen Bedingungen, selbst auf einem sehr kleinen, abgelegenen und lokal geführten Hof mit extensiver Haltungsweise, stark von archäologischen Bedingungen unterscheiden könnten. Fast alle Angaben zur Bestimmung der lokal zu erwarteten Verteilung von $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnissen stammen aus dem archäologischen Kontext, da bei entsprechenden modernen Studien in der Regel größere geografische Gebiete oder nur Proben eines einzelnen Typs miteinander verglichen werden, selten jedoch ein einzelner Standort komplett definiert. Moderne anthropogene Einflüsse, wie Düngemittel und der atmosphärische Eintrag industrieller Verschmutzung, können die Variabilität der für die Tiere bioverfügbaren stabilen Strontiumisotopenverhältnisse an einem Standort potentiell erhöhen. Dies kann direkt oder über die Futter- bzw. Wasseraufnahme geschehen (Hurst & Davis 1981, Åberg et al. 1989, Négrel & Deschamps 1996, Martin & McCulloch 1999, Probst et al. 2000, Bentley 2006, Burton & Price 2013). Darüber hinaus kann Futter heute in höheren Mengen aus einem weiteren Umkreis importiert werden (Bentley 2006, Rummel et al. 2007, Lehn & Graw 2012, Burton & Price 2013). Während das Niedrigenergiefutter aus einem Umkreis von weniger als drei (Gras) bzw. acht (Silage) Kilometern stammte, wurden einzelne Bestandteile des Hochenergiefutters zum Teil aus einem deutlich größeren Umkreis von bis zu 75 Kilometern bezogen (Hülsenfrüchte in der Getreidemischung). Für das hier vorgestellte Fütterungsexperiment konnte sichergestellt werden, dass ausschließlich natürliche, vom Hof selbst produzierte Düngemittel für den Anbau des vor Ort produzierten Futters verwendet wurden. Alle Anbieter der zusätzlich bezogenen Nahrung produzierten ihre Produkte unter Einhaltung der Standards der biologischen Landwirtschaft und benutzten daher ebenfalls keine künstlichen Zusätze.

Der Versuchshof liegt sehr abgeschieden in einer ländlichen Gegend, ohne industrielle Einrichtungen, größere Städte oder großflächige konventionelle Landwirtschaft in unmittelbarer Nähe. Obwohl die modernen Einflüsse also vermutlich vergleichsweise gering ausfallen, könnte es natürlich nichtsdestotrotz sein, dass sie dennoch auch in dieser Studie einen Einfluss ausgeübt und die natürlichen Verteilungsmuster bioverfügbarer Strontiumisotopenverhältnisse verändert haben. Allerdings sollten diese anthropogenen Veränderungen nur dann zu einer signifikanten Erhöhung der Variabilität innerhalb und zwischen den Individuen führen, wenn ihr Einfluss über die Zeit hinweg schwankt. Solche saisonalen und räumlichen Unterschiede in den Strontiumisotopen können auch natürlich auftreten, beispielsweise bedingt durch Schneeschmelze, saisonale Fütterung und Unterschiede zwischen den Futterpflanzen, beispielsweise bezüglich Wurzeltiefe oder unterschiedliche Beiträge von Niederschlags- und Grundwasser (Gosz et al. 1983, Wickman & Åberg 1987, Capo et al. 1998, Hodell et al. 2004, Poszwa et al. 2004, Bentley 2006, Meiggs 2007, Evans et al. 2009, Frei & Frei 2011, Maurer et al. 2012).

c) Zeit- und Altersabhängigkeit

Unabhängig davon, ob moderne oder natürliche Ursachen für die beobachtete Variabilität in den Schweineproben verantwortlich sind, scheint ein zeitlicher Faktor eine maßgebliche Rolle dabei zu spielen. Dies kann zum Beispiel am graduellen Ansteigen der Isotopenverhältnisse von früh mineralisierenden hin zu spät mineralisierenden Zahntypen festgemacht werden. Außerdem zeigt es sich daran, dass die Ferkel deutlich niedrigere $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werte in ihren Knochen aufweisen, als die ausgewachsenen Schweine. Gewebe, welche die Strontiuminputs über größere Zeiträume integrieren, wie beispielsweise Knochen, deren Turnover Monate bis Jahre dauert (siehe **Tabelle 56** im Anhang)

scheinen des Weiteren eine höhere Einheitlichkeit miteinander aufzuweisen, wenn sie zu ähnlichen Zeiten beprobt wurden (ein Monat zwischen erster und zweiter Schlachtung von Individuen 3 und 4 bzw. Individuen 5 und 6). Gewebe mit höheren Turnoverraten hingegen, zeigen eine deutlich stärkere Streuung, selbst innerhalb kurzer Zeiträume und sogar bei Individuen, die zur exakt selben Zeit geschlachtet und beprobt wurden. Die höchste Variabilität in den adulten Schweinen wurde in den stabilen Isotopenverhältnissen des Muskelfleisches von Kau- und Beinmuskeln gefunden, in welchen der Turnover innerhalb von Tagen bis Wochen stattfindet (siehe **Tabelle 56** im Anhang). Hinzu kommt, dass die Knochenproben innerhalb der Ferkel stärker voneinander abweichen, als die Knochen der Schweine untereinander. In den Ferkeln repräsentieren die Knochen einen viel kürzeren Zeitraum, über den sie die verschiedenen Inputs mitteln können. Hinzu kommen unterschiedliche Wachstums- und Turnoverraten der verschiedenen Knochentypen und der Wechsel der Inputs nach der Geburt. Der junge Knochen verhält sich also gewissermaßen ähnlich wie die Weichgewebe und variiert mehr, weil er auf kurzfristige Schwankungen noch sensibler reagiert und diese deutlicher abbildet.

Aus diesen beobachteten Mustern kann alleine aufgrund der Schweineproben geschlossen werden, dass im Verlauf des Experimentes ein altersabhängiger und/oder saisonaler Wechsel der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Inputs stattgefunden haben muss. Da (wie zuvor erläutert) die Strontiumkomposition von Körperwasser und Geweben hauptsächlich vom Futter und nicht vom Trinkwasser bestimmt wird weil es deutlich höhere Konzentrationen an Strontium enthält, erscheint ein Futterwechsel als die plausibelste Erklärung für die zeitliche Variation der Schweinedaten (Baroni et al. 2011, Lewis et al. 2017). Hinzu kommt, dass die gemessenen Strontiumkonzentrationen und –isotopenverhältnisse des Trinkwassers über die Zeit hinweg nachweislich konstant waren. Die Unterschiede in den Schweinewerten müssen also auf eine Veränderung des Futterinputs zurückzuführen sein. Ein solcher Futterwechsel hat innerhalb der Lebenszeit der Versuchstiere, in Abhängigkeit von deren Alter tatsächlich stattgefunden.

Die beiden frühzeitig verstorbenen Individuen (eine bzw. drei Wochen alte Ferkel) waren noch nicht abgesetzt. Aus diesem Grund kann das Isotopensignal in ihrem Körper nur die Nahrungsquellen der Muttersau widerspiegeln, welche in utero und über die Muttermilch in die Ferkel gelangten. Wie im Methodenteil ab Seite 57 beschrieben, bestand die Ernährung der Muttersau (und der jungen Ferkel) fast ausschließlich aus Hochenergiefutter (Getreidemischung und Kartoffeln), sowie geringen Mengen an Brot mit Molke. Hierbei muss allerdings erwähnt werden, dass das jüngere der beiden Ferkel, welches kurz nach der Geburt verstarb möglicherweise krankheitsbedingt oder aufgrund der Nahrungsverweigerung physiologisch verändert gewesen sein könnte. Das zweite Ferkel hingegen kam unfallbedingt zu Tode und sollte demnach die Physiologie eines gesunden Individuums dieses Alters repräsentieren. Die vier geschlachteten Schweine hingegen stellen in ihren Körpergeweben auch spätere Fütterungsbedingungen dar. Ab dem Absetzen bis zu einem Alter von ca. zwölf bis vierzehn Wochen wurde die energiereiche Nahrung allmählich durch energiearme (Gras und Silage) ersetzt, bis das Niedrigenergiefutter in etwa 50 % der Nahrung ausmachte. Da die Bestandteile des Niedrigenergiefutters ausschließlich aus lokalem Eigenanbau stammten, während Kartoffeln und Getreide teilweise von etwas weiter entfernten (aber immer noch regionalen) Anbauflächen/Anbietern bezogen wurden, ist es durchaus plausibel, dass dieser Wechsel in der Fütterung zu den Unterschieden in den Gewebeproben der Schweine geführt hat. Tatsächlich passen die $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werte der Futterproben hervorragend zu dieser These: Das Hochenergiefutter, welches die Ernährung in den frühen Lebensabschnitten dominierte, weist niedrigere Strontiumisotopenverhältnisse auf, als das Niedrigenergiefutter, welches in den späteren Lebensabschnitten eine zunehmende Rolle spielte (siehe **Tabelle 17** und **Abbildung 27**).

Auch das Trinkwasser erreichte in seinen $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnissen höhere Werte, als das Hochenergiefutter, in etwa vergleichbar mit den Werten des Niedrigenergiefutters. Da bei größeren

Tieren im Verhältnis mehr Trinkwasser im Vergleich zum Futter aufgenommen wird und auch für adulte Schweine nachgewiesen ist, dass sich ihr Trinkverhalten drastisch von subadulten Ferkeln unterscheidet, könnte auch diese vermehrte Aufnahme von Trinkwasser in älteren Individuen zusätzlich in geringerem Maße dazu beigetragen haben, dass diejenigen Proben, welche spätere Lebensphasen repräsentieren, höhere $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werte aufweisen (Schoeller 1988, Gill 1989, Brooks & Carpenter 1990, Bryant & Froelich 1995, Kohn et al. 1996). Die Änderungen in der Fütterung (und möglicherweise in der Trinkwassermenge) können also den beobachteten Anstieg der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werte in Zahnschmelz- und Knochenproben über die Lebenszeit hinweg erklären. Das Hochenergiefutter, mit seinen niedrigen $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werten passt somit zu der Tatsache, dass die niedrigsten Isotopenverhältnisse bei den Schweineproben in den Milchzähnen (Bildung in utero) und den Ferkelknochen (konstantes Wachstum in utero und nach der Geburt bis zum Tod) gemessen wurden. Die ersten Molaren liegen isotopisch zwischen den Milchzähnen und den dritten Molaren bzw. Knochen der adulten Tiere. Sie mineralisieren später (von kurz vor der Geburt bis zum zweiten bis dritten Lebensmonat) und sind deswegen bereits moderat durch den Einfluss des Niedrigenergiefutters geprägt. Die dritten Molaren waren zum Zeitpunkt der Schlachtungen (im Alter von 13 bzw. 14 Monaten) noch nicht vollständig mineralisiert, bzw. hatten ihre Bildung erst kürzlich beendet. Ihre Kronen mineralisieren ab dem dritten bis vierten Lebensmonat und ihre Bildung ist in etwa im Alter von zwölf bis dreizehn Monaten abgeschlossen (McCance et al. 1961, Silver 1969, Tonge & McCance 1973, Hillson 1986).

Sie repräsentieren also einen ähnlichen Zeitraum, wie die zugehörigen Knochenproben, was auch die isotopische Ähnlichkeit zu den Schweineknochen erklärt. Diese Isotopen sind stark vom Einfluss des Niedrigenergiefutters mit seinen höheren $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werten geprägt.

d) Abhängigkeit von der Turnoverrate des Gewebes

Während die Hartgewebe diesem fütterungsabhängigen Muster relativ konstant zu folgen scheinen, zeigen die Weichgewebe, welche kürzere Zeitabschnitte repräsentieren, eine ungleichmäßigere Verteilung und eine deutlich höhere Variabilität. Dasselbe gilt für die Knochen junger Individuen, die sich innerhalb und zwischen den Tieren viel stärker voneinander unterscheiden als bei den erwachsenen Schweinen, auch wenn sie im Allgemeinen dem beschriebenen zeitlichen Muster folgen. Eine mögliche Erklärung hierfür ist der Effekt der Biopurifikation. Es hat sich gezeigt, dass Pflanzen und Tiere die natürliche Variabilität der lokalen Strontiumisotopenverhältnisse ihrer Umwelt eingrenzen, indem sie alle lokalen Einflüsse räumlich und zeitlich mitteln (Chamberlain et al. 1996, Blum et al. 2000, Price et al. 2002, Bentley 2006, Burton & Price 2013). Diese Erkenntnis beruht bei Säugetieren hauptsächlich auf Hartgeweben, wie Zähnen, Knochen, Haaren, Geweihen etc., welche die Inputs an Elementen wie Strontium über relativ lange Zeiträume hinweg integrieren (Monate bis Jahrzehnte).

Es ist daher wahrscheinlich, dass die meisten kurzfristigen Fluktuationen der Strontiumisotopeneinflüsse in solchen Körperteilen gemischt und gemittelt werden. Dies muss im Gegensatz dazu nicht für Gewebe mit schnellem Turnover, wie Fleisch, Blut oder bestimmte innere Organe gelten. In diesen können spezifische kurzfristige Schwankungen einen vorübergehend signifikanten Einfluss auf die Zusammensetzung des gesamten Gewebes haben (Phillips & Eldridge 2006). Die hier generierten Daten bestätigen die Biopurifikation lokaler strontiumisotopischer Variation aufgrund von längerfristiger Mischung und Integration, allerdings nur für solche Gewebetypen, die alle möglichen kurzfristigen Schwankungen über eine ausreichend große Zeit abbilden und integrieren. Dies bestätigt frühere Studien, die lokale Grenzwertschätzungen basierend auf Hartgeweben, wie Knochen und Zähnen für die Anwendung im archäologischen und paläontologischen Kontext postuliert haben.

Weichgewebe sind für diese Zwecke scheinbar nicht, oder weniger gut geeignet, was die Frage aufwirft, wie präzise Studien über die Herkunft von Fleisch und anderen Lebensmitteln zumindest in einem modernen Kontext überhaupt sein können, wenn man nur die stabilen Isotope von Strontium betrachtet. Hinzu kommt die Tatsache, dass Lebensmittel oft be- und verarbeitet sind und es auch dadurch nach der Schlachtung zu weiteren Veränderungen der Isotopenverhältnisse kommen kann.

Tatsächlich wird in mehreren Studien über Schwierigkeiten bei der Anwendung der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Analyse zur Bestimmung der Herkunft von Lebensmitteln wie Fleisch oder Milchprodukten berichtet (Crittenden et al. 2007, Franke et al. 2007, Franke et al. 2008). Ähnliche Probleme können und müssen für biologisch inerte Gewebe wie Haare oder Zahnschmelz in Betracht gezogen werden. In solchen Geweben, die sich in kurzer Zeit bilden und anschließend nicht weiter verändern, werden nämlich mögliche saisonale bzw. kurzfristige Effekte ebenfalls nicht über längere Zeiträume gemittelt und können somit einen erheblichen Einfluss haben. Die hier erhobenen Ergebnisse erheben keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit und weitere Studien zur Replikation sind nötig, um sie zu validieren. Anhand der hier gefundenen Verteilungsmuster empfiehlt es sich dennoch, Gewebe mit hohen Turnoverraten (wie Fleisch, Organe oder Blut), sowie Gewebe mit kurzen, abgeschlossenen Bildungszeiten (wie Milchzähne oder Haare) bei der Interpretation der Isotopendaten mit Vorsicht zu behandeln.

4. Fazit und Implikationen

Nach Kenntnisstand des Autors handelt es sich bei den für diese Arbeit durchgeführten Strontiumisotopenuntersuchungen um die ersten Datenerhebungen bezüglich der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse in einem großen Säugetier, bei denen alle relevanten Einflussfaktoren über die gesamte Lebenszeit der Versuchstiere miteinbezogen wurden. Auf einem exemplarischen Versuchshof mit regionalem Futtermittelbezug wurde die lokale Variabilität der stabilen Strontiumisotope von Umwelt-, Nahrungs- und Tiergewebeproben festgehalten. Die Daten stützen die Hypothese einer Biopurifikation der lokalen $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse vom Boden bis zum tierischen mineralisierten Hartgewebe. Für die Bodenproben kann dies ebenfalls postuliert werden, obwohl die Messergebnisse wie zuvor diskutiert offenbar nicht das bioverfügbare Strontium widerspiegeln. Die angestrebte bioverfügbare Fraktion läge dann nämlich in ihrer Verteilung näher an den Futterproben und die Biopurifikation wäre gewissermaßen durch die Extraktionsmethode imitiert worden. Dass die Isotopenverhältnisse von Strontium innerhalb von Gesteinen und Bodenbestandteilen deutlich stärker schwanken, als diejenige Fraktion, die letztendlich von Organismen aufgenommen wird, wurde auch von Burton & Hahn (2016) beschrieben. Da die Schwankungen der Isotopenverhältnisse in den Weichgeweben (vermutlich aufgrund einer zu kurzen Integrationszeit im Vergleich zu den Hartgeweben) deutlich höher waren, ist es fraglich, ob diese in derselben Art und Weise für Herkunftsanalysen geeignet sind.

Des Weiteren konnte nachgewiesen werden, dass selbst auf einer vergleichsweise kleinen und lokal produzierenden landwirtschaftlichen Fläche eine hohe Variabilität in den Nahrungs- und Bodenproben auftreten kann und zwar selbst innerhalb desselben Probenotyps (z.B. Gras). Außerdem können bestimmte (nicht lokale) Futterzusätze, wie das hier der Getreidemischung beigemengte Mineralfutter, einen signifikanten Einfluss auf die isotopische Zusammensetzung haben, selbst wenn diese Zusätze nur in sehr geringen Mengen verwendet werden. Dies muss unbedingt bei zukünftigen Studien zur Lebensmittelaufentifizierung berücksichtigt werden. Bei einigen publizierten Arbeiten aus diesem Bereich war es nicht möglich, verschiedene geographische Regionen anhand der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Analyse lokaler Weichgewebeproben isotopisch voneinander zu unterscheiden (Crittenden et al. 2007,

Franke et al. 2008). Der Einfluss von nicht-lokalen Futterquellen oder –zusatzstoffen könnte ein weiterer Faktor sein, der derartige Versuche erschwert. Sowohl für moderne, als auch für archäologische Untersuchungen sollte zudem beachtet werden, dass eine Veränderung in der Zusammensetzung einzelner Futterbestandteile bzw. Futtertypen (z.B. aufgrund von alters- oder jahreszeitenabhängiger Fütterungsstrategien) auch zu messbaren Veränderungen und Unterschieden der isotopischen Zusammensetzung von Körpergeweben der Konsumenten führen kann (sowohl innerhalb desselben Individuums, als auch zwischen verschiedenen Individuen) (Burton & Hahn 2016). Sind diese Veränderungen groß genug, kann es bei der Interpretation der Daten irrtümlicherweise dazu kommen, dass betroffene Individuen oder Proben als nicht-lokal eingestuft werden. Isotopenbasierte Aussagen in archäologischen Fragestellungen sind stets von konkreten Hypothesen abhängig, die im Vorhinein formuliert werden müssen. Nur so können die Daten sinnvoll interpretiert werden. In zukünftigen Studien sollten die oben genannten Faktoren mit berücksichtigt werden, sodass mögliche Futterwechsel oder nicht-lokale Futterquellen entsprechend einbezogen werden können.

V. Geprüfte publizierte Methoden zur Schätzung der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte

Es existieren verschiedene publizierte Regressionsgleichungen und Massebilanzmodelle, mit denen die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte verschiedener Körperbestandteile geschätzt werden können. Diese unterscheiden sich teilweise extrem in ihrer Komplexität und der Anzahl zu berücksichtigender Variablen. Einige dieser Methoden wurden an den hier erhobenen Daten getestet und es wurde geprüft, ob die entsprechenden Materialien adäquat geschätzt werden können.

Artspezifische lineare Regressionsformeln berechnen den $\delta^{18}\text{O}$ -Wert eines Gewebetyps basierend auf nur einer abhängigen Variablen (oft $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ bzw. $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$) und den, für diese Art und dieses Gewebe, ermittelten Konstanten (Steigung und Achsenverschiebung)). Sie haben einerseits den Vorteil, dass sie ohne viele Zusatzinformationen anwendbar sind und keine zusätzlichen Messdaten erfordern. Andererseits stellen sie eine starke Vereinfachung dar, in der die natürliche innerartliche Variabilität vernachlässigt wird. Der Hypothese nach gilt für jede Art eine eigene lineare Gleichung, die anhand empirischer Daten für die jeweilige Art erhoben werden muss. Je mehr Daten zu einer Tierart oder –gruppe zur Verfügung stehen, desto verlässlicher schätzen die entsprechenden linearen Regressionsformeln den $\delta^{18}\text{O}$ -Wert. Während die Stichprobengrößen für häufig untersuchte Arten, wie den Menschen sehr groß sein können, sind sie für andere Tiergruppen teilweise unzureichend.

Die komplexeren Massebilanzmodelle berücksichtigen neben dem $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ - bzw. $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ -Input auch die Vielfalt und den Einfluss der verschiedenen anderen In- und Outputs in Abhängigkeit von äußeren und inneren Faktoren. Sie haben allerdings den Nachteil, dass für ihre Anwendung die nötige Datengrundlage und das erforderliche Hintergrundwissen verfügbar sein müssen. Sie berechnen $\delta^{18}\text{O}$ von Körperbestandteilen basierend auf der Summe aller In- und Output-Flüssen, sowie deren $\delta^{18}\text{O}$ -Werte und gegebenenfalls auftretenden Fraktionierungsvorgängen und körperinternen Prozessen, die bei der Bildung des jeweiligen Gewebes eine Rolle spielen.

Für diese Arbeit wurden verschiedene Modelle für $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$, $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ getestet und verglichen.

A. Modellierung von $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$

1. Lineare Modellierung:

Longinelli (1984) ermittelte anhand von Daten früherer Studien eine Regressionsgleichung für die Schätzung von $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ in Hausschweinen. Sie basiert auf einem relativ kleinen Datensatz ($n=37$) und lautet:

$$\delta^{18}\text{O}(\text{KW}) = 0.88 * \delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}}) + 2.1$$

Die Daten stammen von Hausschweinen verschiedener europäischer Standorte und dazugehörigen Regenwassermessungen. Die Standardabweichung wurde mit ± 0.05 Promille angegeben und das Bestimmtheitsmaß mit 0.98. Longinelli schloss daraus, dass eine starke lineare Korrelation zwischen Niederschlag und Körperwasser besteht und somit für Individuen derselben Art an einem bestimmten Standort sehr ähnliche $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Werte ohne größere innerartliche (physiologisch oder saisonal bedingte) Schwankungen zu erwarten sind.

Später wurde von Bryant & Froelich (1995) eine statistisch korrigierte Version der Formel veröffentlicht, in der das 95%-Intervall berücksichtigt wird und die Stichprobengröße reduziert ist ($n=9$):

$$\delta^{18}\text{O}(\text{KW}) = 0.83 * \delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}}) + 3.49$$

Das Bestimmtheitsmaß beträgt in Bryant & Froelich's Version der Gleichung nur noch 0.45, weswegen von den Autoren später auch ein komplexeres, nicht-linear von der Körpermasse abhängiges Massebilanzmodell entwickelt wurde. Beide Versionen der Regressionsgleichung wurden an den in dieser Arbeit erhobenen Daten getestet.

2. Massebilanz-Modellierung:

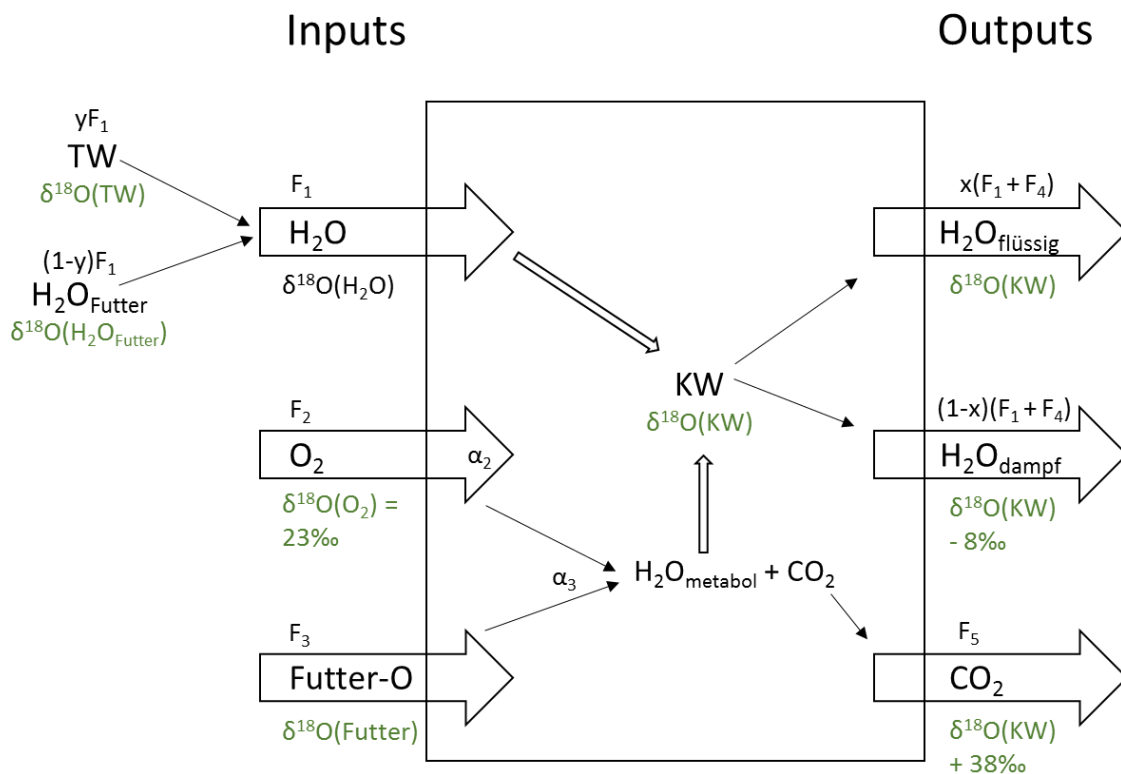


Abbildung 31 Massebilanzmodell nach Luz et al. (1984). Voraussetzung hierfür ist ein Gleichgewicht zwischen Inputs und Outputs („steady-state Modell“). Die konstante Verschiebung von $\delta^{18}\text{O}(\text{CO}_2)$ gegenüber $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ wurde von Luz et al (1989) bestimmt und stimmt mit zuvor publizierten Werten von Pflug et al. (1979) und Brenninkmeijer et al. (1983) für die Fraktionierung bei Körpertemperatur überein.

Alle komplexeren, semimechanistischen Modelle für die Schätzung von $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ basieren im Prinzip auf dem von Luz et al. (1984) vorgeschlagenen Massebilanzmodell, das den Sauerstoffhaushalt als Gleichgewicht zwischen der Summe an Inputs und der Summe an Outputs beschreibt (siehe **Abbildung 31**):

$$\begin{aligned}
 \text{Inputs} & \left\{ \begin{aligned} & F_1 y \delta^{18}\text{O}(\text{TW}) + F_1 (1-y) \delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}}) + \\ & F_2 (\delta^{18}\text{O}(\text{O}_2) + 1000 \alpha_2 - 1000) + \\ & F_3 (\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O}) + 1000 \alpha_3 - 1000) \end{aligned} \right. \\
 & = \\
 \text{Outputs} & \left\{ \begin{aligned} & x(F_1 + F_4) \delta^{18}\text{O}(\text{KW}) + \\ & (1-x) * (F_1 + F_4) (\delta^{18}\text{O}(\text{KW}) + 1000 \beta_1 - 1000) + \\ & F_5 (\delta^{18}\text{O}(\text{KW}) + 1000 \beta_2 - 1000) \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

Für $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ aufgelöst lässt sich auch diese Gleichung als lineare Funktion mit $x = \delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O})$ und $y = \delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ darstellen, allerdings sind Steigung und Achsenverschiebung abhängig von den Flussraten, $\delta^{18}\text{O}$ -Werten und Fraktionierungsfaktoren der anderen In- und Outputs:

$$\delta^{18}\text{O}(\text{KW}) = \frac{F_1}{F_5 + F_6 + F_7} \delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}) + \frac{(1000 \alpha_2 - 1000)F_2}{F_5 + F_6 + F_7} \delta^{18}\text{O}(\text{O}_2) + \frac{F_3}{F_5 + F_6 + F_7} \delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O}) + \frac{(1000 \beta_1 - 1000)F_7 - (1000\beta_2 - 1000)F_5}{F_5 + F_6 + F_7}$$

Da Luz et al. (1984) keine Werte für die Fraktionierungsfaktoren α_1 , α_2 und α_3 zur Verfügung standen, blieb das Modell weitestgehend theoretisch und bildete die Basis für spätere, experimentell überprüfbare Ansätze.

Die meisten publizierten Studien, bei denen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ anhand von Massebilanzen modelliert wird, fußen auf der Arbeit von Bryant & Froelich (1995) (= Bryant-Modell) oder der von Kohn (1996) (= Kohn-Modell), teilweise mit geringfügigen Abweichungen bei der Ermittlung der nötigen Parameter. Beide Modelle folgen demselben mathematischen Prinzip, welches auch schon von Luz et al. (1984) als Basis der Schätzung postuliert wurde. Sie unterscheiden sich jedoch in ihrer Komplexität und damit in ihrer Anwendbarkeit. Während das Kohn-Modell sehr viele physiologische und Umweltparameter in die Berechnung der In- und Output-Flüsse miteinbezieht, vereinfacht das Bryant-Modell alle Flussraten- und Fraktionierungsparameter so weit, dass alle artspezifischen Variablen als nicht-lineare Funktionen der Körpermasse beschrieben werden können. Damit ist das Bryant-Modell auch ohne erheblichen messtechnischen Mehraufwand für nahezu alle Arten von Landsäugetieren anwendbar, solange die Körpermasse des jeweiligen Tieres bekannt ist.

Der Vorteil des Kohn-Modells ist dagegen, dass es für sehr gut untersuchte Arten und extrem gut kontrollierte Versuchsbedingungen sehr präzise Schätzungen liefern und auch artspezifische Anpassungen und individuelle Verhaltensabweichungen miteinbeziehen kann. Aufwändige landwirtschaftliche Studien, mit großen und detaillierten Datensätzen können so beispielsweise den $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Wert von Milchkühen, unter Berücksichtigung klimatischer, saisonaler, physiologischer und fütterungsbedingter Faktoren, auf den Tag genau errechnen (Chen & Auerswald 2018). Für die allermeisten Studien, insbesondere forensische und archäometrische, aber auch häufig in Fragestellungen der Lebensmittelkontrolle, stehen die hierfür nötigen Daten nicht zur Verfügung, was auch für diese Arbeit gilt. Es ist daher sinnvoll, sich näher mit dem Ansatz von Bryant & Froelich (1995) auseinanderzusetzen und ihn empirisch zu überprüfen. Das Bryant-Modell ist in **Abbildung 32** grob skizziert.

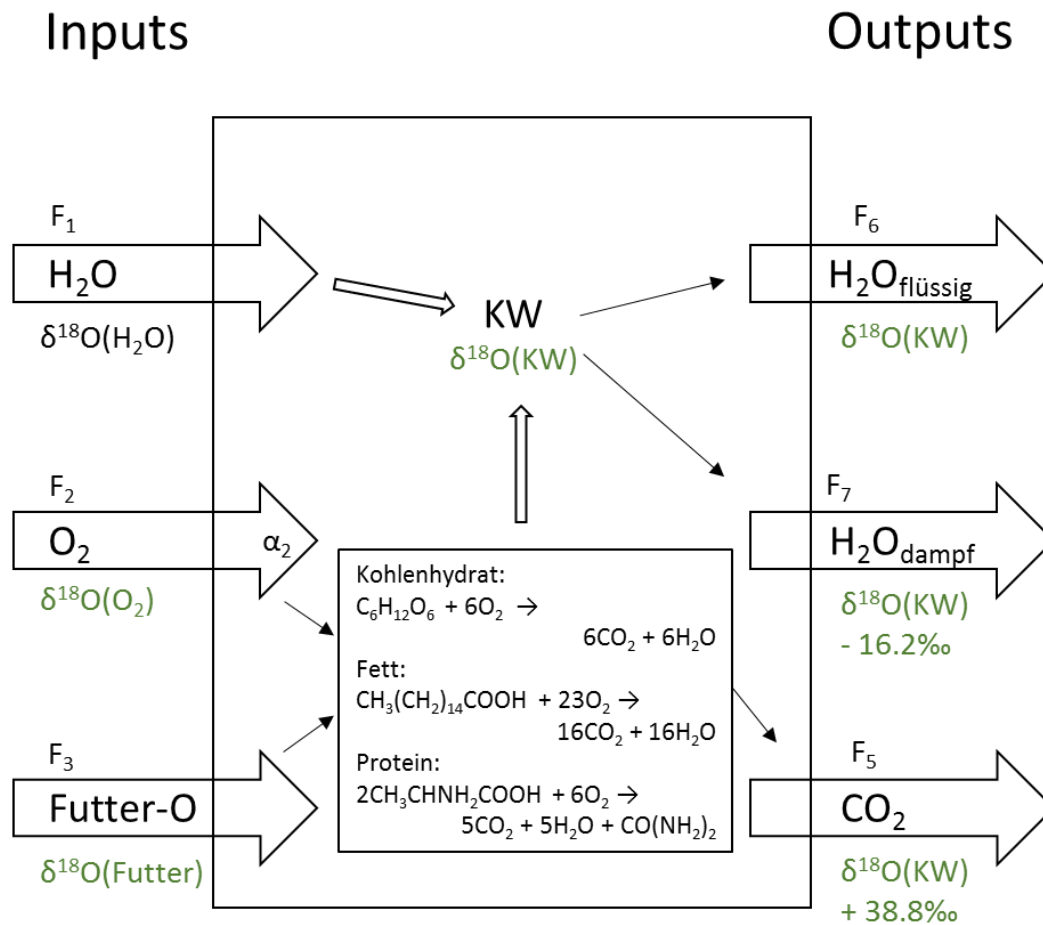


Abbildung 32 Massebilanzmodell nach Bryant & Froelich (1995).

Laut der Hypothese des Bryant-Modells können alle relevanten Sauerstoffflüsse (F_1 - F_7) anhand physiologischer Größen geschätzt werden, die nicht-lineare Funktionen der Körpermasse sind. Die vereinfachte, nach $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ aufgelöste Massebilanzgleichung von Bryant & Froelich (1995) lautet:

$$\delta^{18}\text{O}(\text{KW}) = \frac{\text{TWF} - 0.5\text{RqH}}{\text{TWF} + \text{RqH}} \delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}) + \frac{\text{H}(1.5\text{Rq} - 1)}{\text{TWF} + \text{RqH}} \delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O}) + \frac{17.2\text{H} + 16.2\text{EWL} - 38.8\text{RqH}}{\text{TWF} + \text{RqH}}$$

In **Tabelle 24** sind die darin verwendeten physiologischen Größen, sowie deren Berechnung über die Körpermasse (M) erläutert. **Tabelle 25** fasst zusammen, wie die verschiedenen Input- und Output-Flussraten über diese Größen berechnet werden und woher die Daten für die zugehörigen $\delta^{18}\text{O}$ -Werte stammen. 17.2, 16.2 und 38.8 im letzten Bruch beschreiben jeweils das durch Fraktionierung zustande kommende Delta von $\delta^{18}\text{O}(\text{O}_2)$, $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{dampf}})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{CO}_2)$. Die vom Bryant-Modell verwendeten Werte für die In- und Output-Fraktionierungsfaktoren sind in **Tabelle 26** zusammengefasst.

Tabelle 24 Erläuterung und Berechnung der physiologischen Größen, die für die Schätzung von $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ nach Bryant & Froelich (1995) benötigt werden. Alle davon können über die Körpermasse (M) berechnet werden.

Physiologische Variablen			
Bezeichnung	Variable	Wert oder Gleichung	Quelle
H	Metabolische Rate	$H = 1.61M^{0.808}$	McNab (1988)
TWF	Total Water Flux (Gesamtwasserfluss)	$\text{TWF} = 3.04M^{0.946}$	Nagy (1989)
EWL	Evaporativer H_2O -Verlust	$\text{EWL} = 1.088M^{0.883}$	Altman & Dittmer (1968)
Rq	Respirationsquotient	$\text{Rq} = 0.90$	Bryant & Froelich (1995)
M	Körpermasse	gemessen	gemessen

Tabelle 25 Inputs und Outputs laut dem Bryant-Modell. Alle Flussraten können über die in Tabelle 24 beschriebenen Größen berechnet (geschätzt) werden. Bei den $\delta^{18}\text{O}$ -Werten handelt es sich entweder um Literaturwerte, auf Literaturwerten basierende Schätzungen oder im Zuge des Experiments erhobene Messwerte.

	Sauerstoffflüsse		Isotopenverhältnisse		Quelle
Input	F_1 : H_2O -Input	$F_1 = \text{TWF} - 0.5 \cdot \text{Rq} \cdot H$	$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O})$	$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Input}}) = \gamma \cdot \delta^{18}\text{O}(\text{TW}) + (1-\gamma) \cdot \delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$	gemessen
	$\gamma \cdot F_1$: Anteil TW		$\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$	gemessen	gemessen
	$(1-\gamma) \cdot F_1$: Anteil $\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}}$		$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$	gemessen	gemessen
	F_2 : O_2	$F_2 = H$	$\delta^{18}\text{O}(\text{O}_2)$	$\delta^{18}\text{O}(\text{O}_2) = 23.5 - 6.3\text{‰} = 17.2\text{‰}$	Kroopnick & Craig (1972); Bryant & Froelich (1995)
	F_3 : Futter-O	$F_3 = H \cdot (1.5 \cdot \text{Rq} - 1)$	$\delta^{18}\text{O}(\text{Futter})$	gemessen	gemessen
Output	F_5 : CO_2	$F_5 = \text{Rq} \cdot H$	$\delta^{18}\text{O}(\text{CO}_2)$	$\delta^{18}\text{O}(\text{CO}_2) = \delta^{18}\text{O}(\text{KW}) + 38.8\text{‰}$ (bei 37°C)	Brenninkmeijer et al. (1983)
	F_6 : $\text{H}_2\text{O}_{\text{flüssig}}$	$F_6 = \text{TWF} - \text{EWL}$	$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{flüssig}})$	$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{flüssig}}) = \delta^{18}\text{O}(\text{KW})$	(Schoeller et al. 1986)
	F_7 : $\text{H}_2\text{O}_{\text{dampf}}$	$F_7 = \text{EWL}$	$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{dampf}})$	$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{dampf}}) = \delta^{18}\text{O}(\text{KW}) - 16.2\text{‰}$	Bryant & Froelich (1995)
			$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Atem}})$	$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{dampf-Atem}}) = \delta^{18}\text{O}(\text{KW}) - 8.3\text{‰}$	Bottinga & Craig (1968)
			$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Transkutan}})$	$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{dampf-Transkutan}}) = \delta^{18}\text{O}(\text{KW}) - 19\text{‰}$	Schoeller et al. (1986)

Tabelle 26 Werte für die Fraktionierungsfaktoren des Bryant-Modells.

Fraktionierungsfaktoren:		Wert	Quelle
α_1	zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$	Nicht nötig: $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$ direkt gemessen	gemessen
α_2	zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{O}_2)$ in der Atmosphäre und $\delta^{18}\text{O}(\text{O}_2)$ im Hämoglobin	$\alpha_2 \approx 0.9937$ (-6.3‰)	Kroopnick & Craig (1972); Bryant & Froelich (1995)
β_1	zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{dampf}})$	$\beta_1 \approx 0.9838$ (-16.2‰)	Bryant & Froelich (1995); Bottinga & Craig (1968); Schoeller et al. (1986)
β_2	zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{CO}_2)$	$\beta_2 \approx 1.0388$ (+38.8‰)	Brenninkmeijer et al. (1983)

Das Modell von Bryant & Froelich (1995) gilt nach eigener Aussage für terrestrische Säugetiere zwischen 1 und 4500 kg, die sich zumindest annähernd ausschließlich herbivor ernähren. Es nimmt an, dass sich das modellierte Tier im Stoffgleichgewicht befindet, das heißt, dass der tägliche Netto-Input dem Netto-Output entspricht, das Tier also insgesamt nicht signifikant an Masse zu- oder abnimmt (die Problematik heranwachsender Tiere, wie sie in dieser Arbeit untersucht wurden, wird in späteren Kapiteln diskutiert). Außerdem sind laktierende und noch nicht abgestillte Individuen ausgeschlossen, weil Milchproduktion und Milchkonsum das H_2O -Gleichgewicht und den Respirationsquotienten (Rq) stark beeinflussen (Kleiber 1961, Schmidt-Nielsen 1997). Das Bryant Modell wurde auf die in dieser Arbeit erhobenen Messdaten angewendet und mit den gemessenen Werten für $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ verglichen. Dabei wurde bei den nicht-adulten Individuen berücksichtigt, dass diese streng genommen teilweise nicht die Voraussetzungen (kein Netto-Wachstum, keine noch nicht abgestellten Tiere) entsprechen. Die damit einhergehenden Folgen werden im Diskussionsteil näher erörtert.

Neben dem Modell von Bryant & Froelich (1995) wurden in dieser Arbeit noch weitere Varianten der Massebilanz-Modellierung für $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ angewandt, die sich nur in den Details zur Berechnung der Sauerstoffflüsse und den verwendeten Fraktionierungsfaktoren unterscheiden, mathematisch aber grundsätzlich dem Prinzip von Luz et al. (1984), Bryant & Froelich (1995) bzw. Kohn (1996) folgen: Die Modelle, welche von Gretebeck et al. (1997) bzw. Podlesak et al. (2008), welche von den Autoren in absoluten $^{18}/^{16}\text{O}$ -Verhältnissen angegeben werden, was den Vorteil hat, dass Fraktionierungsfaktoren ohne Umrechnung auf Promille einbezogen werden können:

$$^{18}/^{16}\text{O}(\text{KW}) = \frac{F_1 \delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}) + F_3 \text{ }^{18}/^{16}\text{O}(\text{Futter-O}) + \alpha_2 F_2 \text{ }^{18}/^{16}\text{O}(\text{O}_2)}{F_6 + \beta_1 F_7 + \beta_2 F_5}$$

Abgesehen davon entspricht die zugrundeliegende Mathematik aber den anderen Massebilanz-Modellen. Im Gegensatz zum Bryant-Modell wird hier allerdings nicht die Körpermasse zur Berechnung der Flussraten herangezogen. Stattdessen basiert die Schätzung des Anteils an metabolischem Wasser auf dem Prinzip der Stöchiometrie bei der Verstoffwechselung von Nahrung. Vereinfachend wird dabei angenommen, dass lediglich Kohlenhydrate verstoffwechselt werden.

Geprüfte publizierte Methoden zur Schätzung der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte

Podlesak et al. (2008) übernehmen für ihre Schätzungen an Ratten direkt Flussraten-Werte aus Studien mit doppelt markiertem Wasser an Menschen von Gretebeck et al. (1997):

$$^{18/16}\text{O}(\text{KW}) = \frac{0.62\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}) + 0.14^{18/16}\text{O}(\text{Futter-O}) + \alpha_2 0.24^{18/16}\text{O}(\text{O}_2)}{0.62 + \beta_1 0.14 + \beta_2 0.24}$$

Die konkreten Werte für F_1 - F_7 sind in **Tabelle 27** zusammengefasst.

Tabelle 27 Werte für die Sauerstoffflüsse, die im Gretebeck-Modell verwendet werden.

Sauerstofffluss	Wert	Quelle
F_1	0.62	Gretebeck et al. (1997) (Messungen mit doppelt markiertem Wasser am Menschen, von Podlesak et al. (2008) auch auf Ratten angewendet)
F_2	0.24	
F_3	0.14	
F_5	0.24	
F_6	0.62	
F_7	0.14	

Obwohl in diesem Modell also weder physiologische, noch klimatische Faktoren eine Rolle spielen, wird $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ laut Podlesak et al. (2008) artübergreifend, alleine anhand des Einflusses von Futter und Wasser, auf 1 ‰ genau geschätzt. **Tabelle 28** zeigt, dass die von Gretebeck et al. und Podlesak et al. verwendeten Fraktionierungsfaktoren teilweise deutlich von denen des Bryant-Modells, aber auch voneinander abweichen. Da sie artunabhängig eingesetzt werden können, wurden die Modelle von Gretebeck et al. und Podlesak et al. auch mit den Fraktionierungsfaktoren des Bryant-Modells getestet.

Tabelle 28 Die von Gretebeck et al. (1997) und Podlesak et al. (2008) verwendeten Fraktionierungsfaktoren mit entsprechenden Quellenangaben.

Fraktionierungsfaktoren:		Wert	Quellen
α_2	zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{O}_2)$ in der Atmosphäre und $\delta^{18}\text{O}(\text{O}_2)$ im Hämoglobin	Gretebeck et al. (1997): $\alpha_2 \approx 0.992$ (-8‰) Podlesak et al. (2008): $\alpha_2 \approx 0.9916$ (-8.4‰)	Zanconato et al. (1992)
β_1	zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{dampf}})$	Gretebeck et al. (1997): $\beta_1 \approx 0.992$ (-8‰) Podlesak et al. (2008): $\beta_1 \approx 0.985$ (-15‰) (nasal: 0.991, oral: 0.991, transkutan: 0.981)	Schoeller et al. (1986); Podlesak et al. (2008)
β_2	zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{CO}_2)$	$\beta_2 \approx 1.038$ (+38‰)	Schoeller et al. (1986)

B. Modellierung von $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$

1. Lineare Modellierung:

Artspezifische lineare Regressionen für die Schätzung von $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ anhand von $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ bzw. $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ wurden von Ehleringer et al. (2008) und Bowen et al. (2009) für den Menschen ermittelt. Ehleringer et al. (2008) untersuchten rezente Haare von verschiedenen Orten innerhalb der USA und dazugehörige lokale Leitungswasserproben, wobei eine landesweit einheitliche „Supermarktnahrung“ angenommen wurde. Die daraus abgeleitete lineare Regressionsgleichung lautet:

$$\delta^{18}\text{O}(\text{Haar}) = 0.353 * \delta^{18}\text{O}(\text{TW}) + 15.2 \quad (r^2 = 0.86, p < 0.001)$$

Bowen et al. (2009) stellten ähnliche Untersuchungen an historischem Material (Kopfhaar) an, dessen $\delta^{18}\text{O}$ -Daten sie mit dem berechneten $\delta^{18}\text{O}(\text{OIPC})$ in Relation setzten. Ihre Regressionsgleichung unterscheidet sich deutlich von der von Ehleringer et al., unter anderem weil sie Proben von mehreren Kontinenten aus vorglobalisierten Zeiten untersuchten, wodurch der Einfluss lokaler Nahrung von größerer Bedeutung ist:

$$\delta^{18}\text{O}(\text{Haar}) = 0.7 * \delta^{18}\text{O}(\text{TW}) + 19.24 \quad (r^2 = 0.77)$$

Für Schweineborsten existieren solche linearen Gleichungen nicht. Die Gleichungen von Ehleringer et al. (2008) und Bowen et al. (2009) wurden dennoch an den in dieser Arbeit erhobenen Daten getestet, um mögliche interspezifische Unterschiede und Gemeinsamkeiten diskutieren zu können. Wie bereits bei der Schätzung von $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$, gilt auch bei $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$, dass in solchen linearen Regressionsgleichungen weder innerartliche Variabilität, noch andere Inputs als $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ berücksichtigt werden.

2. Massebilanz-Modellierung:

Komplexere Modelle zur Berechnung der stabilen Sauerstoffisotopenverhältnisse in Haaren beschreiben $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ als Funktion des Darmwassers (DW), welches seinerseits wiederum aus dem Körperwasser (KW) und dem Wasser-Input ($\text{H}_2\text{O} = \text{TW} + \text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}}$) modelliert wird. In dieser Arbeit wurden die Modelle von Podlesak et al. (2008), Ehleringer et al. (2008), Bowen et al. (2009) und O'Grady et al. (2012) angewandt und verglichen.

Mit Ausnahme von Podlesak et al. (2008) folgen alle davon demselben Schema: Zuerst wird $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ modelliert, wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben. Auf diese Modellierung wurde hier verzichtet, da konkrete Messwerte für $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ zur Verfügung standen und sich die Massebilanz-Modelle für die Schätzung von $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ teilweise in bestimmten Parametern unterscheiden, was zu Unsicherheiten führt, die in diesem Fall vermieden werden können. Ausgehend vom Körperwasser wird dann $\delta^{18}\text{O}(\text{DW})$ nach folgender Grundgleichung berechnet:

$$\delta^{18}\text{O}(\text{DW}) = g_1 * \delta^{18}\text{O}(\text{KW}) + g_2 * \delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O})$$

Hierbei sind g_1 und g_2 die jeweiligen relativen Anteile von Körperwasser und Nahrungswasser ($\text{TW} + \text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}}$) im Darmwasser. Dabei werden, je nach Autor, unterschiedliche Werte für g_1 und g_2 geschätzt. **Tabelle 29** fasst die in den jeweiligen Studien verwendeten Werte zusammen.

Tabelle 29 In verschiedenen Studien angenommene Werte für g_1 und g_2 .

	Nach Ehleringer et al. (2008)	Nach Bowen et al. (2009)	nach O'Grady et al. (2012)
g_1 = Anteil von KW im DW	0.75	0.57	1
g_2 = Anteil von H_2O im DW	0.25	0.43	0
Untersuchte Tierart	Menschen	Menschen	Makaken
Quelle	Malagelada et al. (1976)	Ehleringer et al. (2008), Malagelada et al. (1976)	Annahme: O'Grady et al. (2012)

Im Modell von O'Grady et al. wird angenommen, dass der Sauerstoffaustausch an der Darmwand so schnell stattfindet, dass nur $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ eine Rolle für $\delta^{18}\text{O}(\text{DW})$ spielt und also beide gleichzusetzen sind. Wie hoch g_1 und g_2 tatsächlich sind, hängt neben der Austauschrate an der Darmwand auch von der Menge sekretierter Darmflüssigkeit und der Trinkwassermenge ab.

Podlesak et al. (2008) hingegen berechnen in ihrer Studie an Ratten $\delta^{18}\text{O}(\text{DW})$ nach folgender Gleichung (wieder mit den Flussraten-Werten von Gretebeck et al. (1997) und nicht in der δ -Notation):

$$^{18/16}\text{O}(\text{DW}) = \frac{^{18/16}\text{O}(\text{KW}) \cdot 0.62 + ^{18/16}\text{O}(\text{O}_2) \cdot 0.24 \cdot 0.992 + ^{18/16}\text{O}(\text{Futter}) \cdot 0.14}{0.62 + 0.14 \cdot 1 + 0.24 \cdot 1.038}$$

Alle vier Varianten wurden an den für diese Arbeit erhobenen Daten zur Haarmodellierung getestet und die jeweiligen Einflüsse von Körperwasser und Nahrungswasser diskutiert.

Ausgehend vom so geschätzten $\delta^{18}\text{O}(\text{DW})$ muss noch der Fraktionierungsfaktor $\alpha_0 = 1.0164$ zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{DW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ angewandt werden (Kreuzer-Martin et al. 2003):

$$\delta^{18}\text{O}(\text{Haar}) = \alpha_0(1000 + \delta^{18}\text{O}(\text{DW})) - 1000$$

Auf diese Weise wurden anhand der Messwerte für $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ Schätzungen für $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ angestellt und mit den tatsächlichen Messdaten für $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ verglichen.

C. Modellierung von $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$

1. Lineare Modellierung:

Longinelli (1984) untersuchte neben dem Körperwasser von Hausschweinen auch deren Knochenphosphat und ermittelte eine lineare Regressionsgleichung für die Beziehung zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$:

$$\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-}) = 0.86 * \delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}}) + 22.71$$

Auch hier beträgt das Bestimmtheitsmaß 0.98 und die Standardabweichung ± 0.005 . Es wurde daraufhin postuliert, dass eine konstante Fraktionierung zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ in gleichwarmen Tieren besteht. Bei gleicher Körpertemperatur und ohne den Einfluss anderer Faktoren (wie eine ernährungsbedingte Änderung von $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ über die Zeit hinweg), sollte die Fraktionierung auch artübergreifend mehr oder weniger konstant sein. Auch für ein Massebilanz-Modell zur Schätzung des $\delta^{18}\text{O}$ -Wertes von Knochen- oder Zahnschmelz-Phosphat muss also zunächst $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ modelliert werden, um daraus den Wert für $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ über die konstante Gleichgewichtsfractionierung abzuleiten. Der entsprechende Fraktionierungsfaktor ist $\alpha_{\text{PO}_4\text{-KW}}$ und beträgt basierend auf den Schweinedaten von Longinelli (1984) 1.0209 ($\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-}) = \delta^{18}\text{O}(\text{KW}) + 20.9\text{‰}$). Spätere Studien an anderen Arten, kamen zu geringfügig davon abweichenden Werten für $\alpha_{\text{PO}_4\text{-KW}}$ (Luz & Kolodny 1985, d'Angela & Longinelli 1990, Podlesak et al. 2008). Die Stichprobengrößen waren in allen diesen Studien vergleichsweise gering.

Tabelle 30 Publierte Werte für $\alpha_{\text{PO}_4\text{-KW}}$. Angegeben ist neben der Quelle auch, welche Tierart und welches Gewebe untersucht wurden, sowie die Stichprobengröße (n).

$\alpha_{\text{PO}_4\text{-KW}}$	$\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-}) \rightarrow \delta^{18}\text{O}(\text{KW})$	Quelle	Art	Material	n
1.0209	+ 20.9 ‰	Longinelli (1984)	Hausschwein	Knochen	32
1.0178	+ 17.8 ‰	Luz & Kolodny (1985)	Ratte	Zahnschmelz	5
1.0172 1.0175	– + 17.2 – 17.5 ‰	d'Angela & Longinelli (1990)	Rind	Knochen	23
1.0180	+ 18.0 ‰	Podlesak et al. (2008)	Ratte	Zahnschmelz	7

In **Tabelle 30** sind Werte für $\alpha_{\text{PO}_4\text{-KW}}$ zusammengefasst. Die Differenz zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ wurde für die in dieser Arbeit untersuchten Individuen berechnet und mit diesen publizierten Daten verglichen. Die lineare Regressionsgleichung von Longinelli (1984) für Hausschweine wurde ebenfalls an den erhobenen Daten angewandt. Bei der Interpretation von $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Daten aus dem Skelettgewebe als Funktion von $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ ist es ausschlaggebend zu beachten, dass der PO_4^{3-} -Pool zwar direkt vom KW-Pool beeinflusst wird, jedoch eine deutlich geringere Turnover-Rate besitzt, wodurch sich Änderungen in $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ nicht unmittelbar, sondern zeitlich versetzt im $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ des Knochens niederschlagen und im Zahnschmelz nach der Mineralisation überhaupt kein Austausch mehr mit dem Körperwasser stattfindet.

VI. Ergebnisse (Sauerstoff)

Abbildung 33 bietet einen Überblick aller gemessenen $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Umwelt- und Schweineproben in einem Boxplot. Die Proben sind nach Typ (z.B. Milzhahn, Leber oder Getreide) sortiert und in Kategorien (Trinkwasser, Futter, Weichgewebe, Bioapatit, Borsten) zusammengefasst. Innerhalb der Kategorien „Futter“ und „Weichgewebe“ sind jeweils die Messergebnisse für die Trockenmasse und das enthaltene Wasser separat angegeben. Wie zu erkennen ist, weist das Trinkwasser ($\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$) sowohl die geringste Streuung, als auch die insgesamt niedrigsten $\delta^{18}\text{O}$ -Werte auf. Die Trockenmasse des Futters ($\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$) streut über eine deutlich größere Spanne und bildet den oberen Rahmen der gemessenen $\delta^{18}\text{O}$ -Daten. Das im Futter enthaltene Wasser ($\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$) dagegen streut deutlich weniger und liegt kurz oberhalb der Trinkwasserwerte. Auch das Körperwasser ($\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$) liegt isotopisch nah an $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$, diesen gegenüber wiederum leicht nach oben verschoben. Die Spanne von $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ ist allerdings höher als die von $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$. Alle an den untersuchten Schweinen gemessenen $\delta^{18}\text{O}$ -Werte liegen zwischen den Werten von Trinkwasser und Futter, es gibt keine Überschneidungen mit $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$. Alle Schweinewerte sind also gegenüber dem Trinkwasser isotopisch angereichert. Die organischen Schweineproben (Trockenmasse der Weichgewebe ($\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$) und Borsten ($\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$)) weisen innerhalb der Schweineproben die größte Variabilität auf und liegen deutlich über dem Körperwasser. $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ ist dabei insgesamt niedriger als $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ und streut unter den organischen Proben typen am stärksten. Die Streuung der Phosphatproben ($\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$) ist insgesamt deutlich geringer, als die der Weichgewebe und Borsten. Die $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Werte liegen im Mittel ungefähr auf derselben Höhe, wie die Ergebnisse von $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$.

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der jeweiligen Kategorien im Einzelnen näher beschrieben, angefangen mit den Umweltproben, gefolgt von den verschiedenen Proben typen der Testschweine. Tabellen mit allen Einzelmesswerten, sowie näheren Informationen zu den Beprobungszeiten finden sich im Anhang. Auf die entsprechenden Tabellen wird im jeweiligen Abschnitt verwiesen.

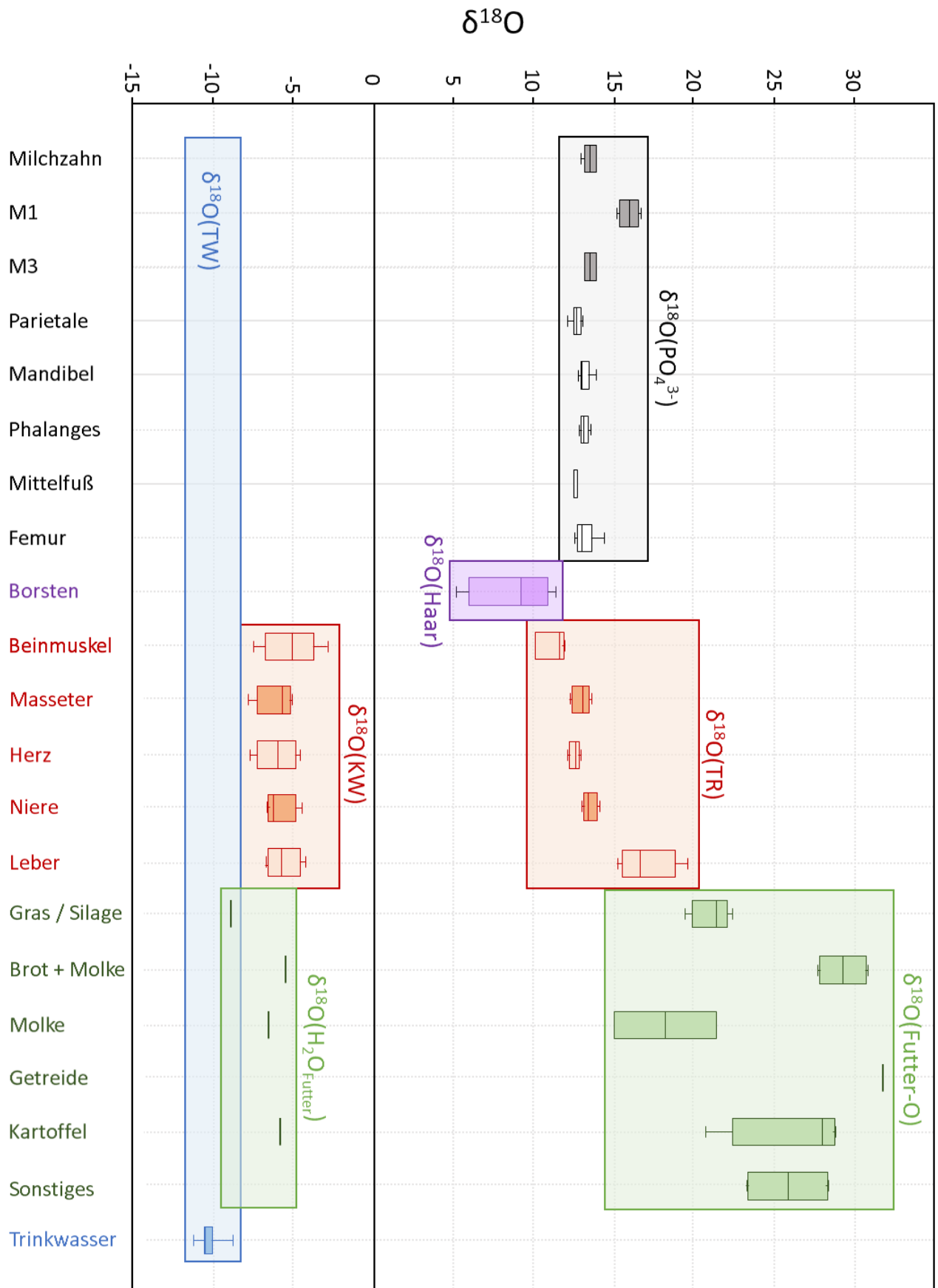


Abbildung 33 Boxplot: Gesamtübersicht über die $\delta^{18}\text{O}$ -Ergebnisse, aufgeteilt nach Probenotyp und zusammengefasst nach Kategorien: Blau: Trinkwasser, Grün: Futter, Rot: Weichgewebe, Lila: Borsten, Grau: Phosphat im Bioapatit von Knochen und Zahnschmelz.

A. Umweltproben

1. Trinkwasser

Von allen gemessenen Probenotypen streut das Trinkwasser am wenigsten, nämlich insgesamt nur über eine Spanne von 2.48 ‰. $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ weist zudem die insgesamt niedrigsten Werte auf, mit geringfügigen Überschneidungen mit $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$. Wasserproben wurden von vier verschiedenen Quellen genommen, die alle den Testindividuen potentiell zur Verfügung standen. Über die Dauer des Experiments wurde die Quelle „Leitungswasser“ jedoch nicht von den Schweinen konsumiert, da dieses Wasser nur dann gegeben wird, wenn die Quelle, aus der die Tränken ansonsten gespeist werden, austrocknet.

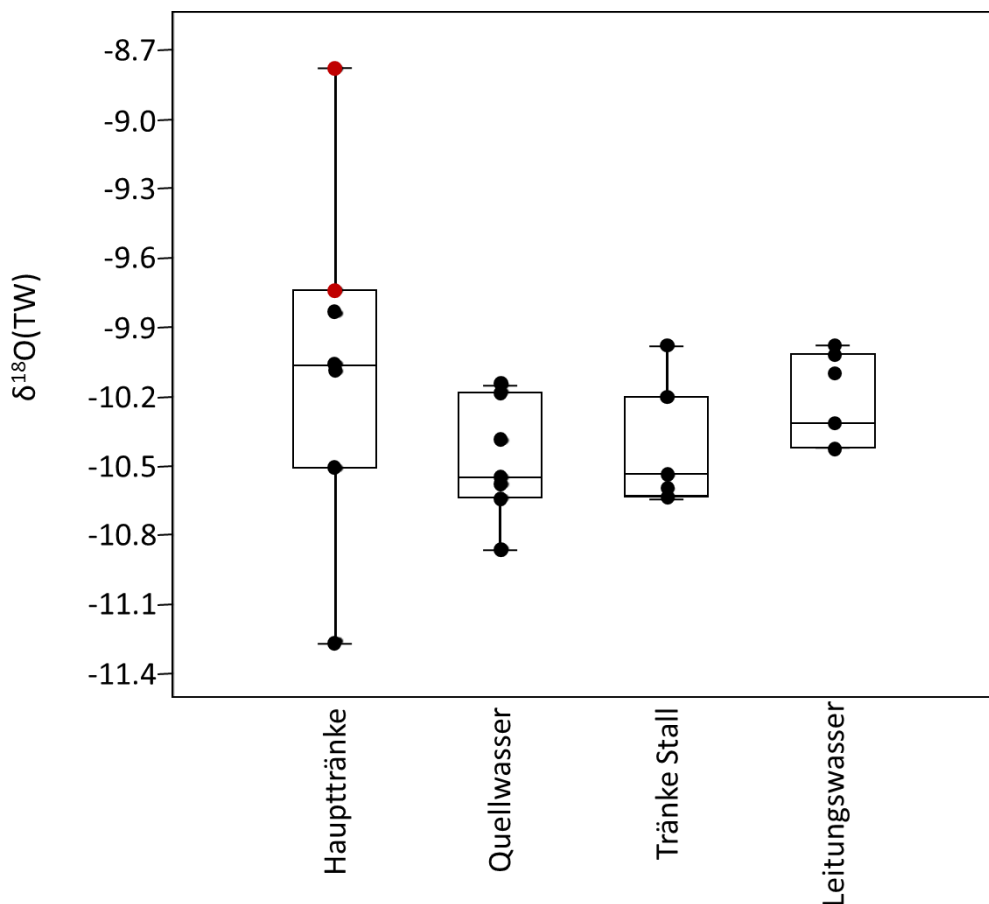


Abbildung 34 Boxplot der $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ -Ergebnisse, aufgeteilt nach Wasserquellen. Die Einzelmesswerte sind als Punkte angezeigt. Rot markiert sind zwei Werte, die möglicherweise durch Evaporationsprozesse nach der Beprobung verändert wurden.

Wie in **Abbildung 34** zu erkennen ist, ähneln alle vier Quellen einander in ihren $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ -Werten. Rot markiert sind darin zwei Messwerte (P-Wa-17a und P-Wa-29a) aus der Haupttränke, die laut $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ -Messungen möglicherweise von Evaporationseffekten nach der Beprobung betroffen sein könnten. Ohne diese beiden Messwerte, ähneln die einzelnen Trinkwasserquellen einander isotopisch noch mehr. Außerdem wird die allgemeine Streuung von $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ ohne diese Werte weiter verringert und der Mittelwert verschiebt sich noch weiter nach unten. Da aber nicht ausgeschlossen werden kann, dass die evaporative Anreicherung vor der Beprobung stattgefunden hat und demnach das so angereicherte Wasser theoretisch auch von den Schweinen getrunken werden konnte, wurden die

erhöhten Werte trotzdem in der Auswertung berücksichtigt. Stichprobengröße, Wertebereich (minimaler Wert und maximaler Wert), sowie die Spanne der Streuung (Differenz von maximalem und minimalem Wert), der Mittelwert und die Standardabweichung der Gesamtstichprobe von $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$, sowie der einzelnen Wasserquellen finden sich in **Tabelle 31**. Dort sind auch die p-Werte des Shapiro-Wilk-Tests auf Normalverteilung angegeben, der für jede Wasserquelle, sowie die Gesamtstichprobe durchgeführt wurde. Die Mittelwerte und Standardabweichungen der einzelnen Wasserquellen liegen sehr nah beieinander und unterscheiden sich nicht signifikant voneinander (siehe **Tabelle 32**). Dies wurde für normalverteilte Datensätze mittels T-Test und für nicht normalverteilte mittels Mann-Whitney-Test überprüft. Es kann also davon ausgegangen werden, dass alle vier Wasserquellen zu einer Gesamtstichprobe gehören und somit alle $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ -Werte gemeinsam betrachtet werden können. Im Folgenden können alle vier Wasserquellen also als Teilstichproben einer lokalen Gesamtwasserquelle zusammengefasst werden.

Tabelle 31 $\delta^{18}\text{O}$ -Verteilung der Umwelt- und Trinkwasserproben-Ergebnisse ($\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$). Angegeben sind die Stichprobengrößen, Gesamtwertebereiche, Mittelwerte und Standardabweichungen der Gesamtstichprobe und der einzelnen beprobten Wasserquellen. Die Datensätze wurden auch auf Normalverteilung getestet (Shapiro-Wilk Test). Rot markiert sind Datensätze, die signifikant von einer Normalverteilung abweichen.

Datensatz	Stich- proben- größe (n)	Werte- bereich (‰)	Spanne (‰)	Mittel- wert (‰)	Standard- abweichung (‰)	Normalverteilung (Shapiro-Wilk Test)
Gesamt	28	-11.26 - 8.78	2.48	-10.30	0.44	<i>p = 0.011</i>
Haupttränke	7	-11.26 -8.78	2.48	-10.04	0.76	p = 0.813
Quellwasser	7	-10.86 -10.15	0.71	-10.48	0.26	p = 0.686
Tränke Stall	7	-10.64 -9.98	0.66	-10.45	0.26	<i>p = 0.023</i>
Leitungswasser	7	-10.42 -9.98	0.44	-10.24	0.20	p = 0.054
Trinkwasser (ohne Leitungs-wasser)	21	-11.26 - 8.78	2.48	-10.32	0.50	<i>p = 0.027</i>

Tabelle 32 Wasserquellen: Test auf gleiche Mittelwerte. T-Test für normalverteilte Datensätze, Mann-Whitney-Test für den Vergleich von Datensätzen, bei denen mindestens einer nicht normalverteilt ist. Es konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Wasserquellen festgestellt werden.

T-Test	
Haupttränke / Quellwasser	p = 0.172
Haupttränke / Leitungswasser	p = 0.518
Quellwasser / Leitungswasser	p = 0.075
Mann-Whitney	
Haupttränke / Tränke Stall	p = 0.096
Quellwasser / Tränke Stall	p = 0.949
Trinkwasser (ohne Leitungswasser) / Leitungswasser	p = 0.276

Wie in **Tabelle 33** zu erkennen, unterscheiden sich die Proben auch nicht bezüglich der Tageszeit der Beprobung (morgens und nachmittags). Es konnten ebenfalls keine konsistenten Muster oder Trends für eine korrelative Beziehung zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ und klimatischen Faktoren, wie Datum (also Jahreszeit bzw. Wetter), Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit nachgewiesen werden. Wie in **Abbildung 35** dargestellt, schwanken die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des Trinkwassers über das Jahr hinweg kaum. Die vier abgebildeten Messwerte entsprechen den Mittelwerten der Einzelmessungen für den jeweiligen Monat (Daten zu April, Juni, August und November). Zusätzlich angegeben ist der Mittelwert der monatlichen $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ -Ergebnisse als horizontale Linie. Vergleichsweise sind in **Abbildung 35** auch die interpolierten Schätzungen für das monatliche und jährliche lokale Niederschlagswasser ($\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$) des Standortes angegeben (www.waterisotopes.org; Bowen (2015)). Das durch OIPC berechnete jährliche Mittel liegt sehr nah am Mittel der hier erhobenen Messwerte für $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ (Differenz: 0.55 ‰). Die zu erwartenden saisonalen Schwankungen, die durch den OIPC-Kalkulator für $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ berechnet werden, finden sich in den Messwerten überhaupt nicht wieder. Der Grund hierfür ist die Tatsache, dass das Trinkwasser der Schweine nicht aus dem lokalen Regenwasser bestand, sondern aus lokalem Grund- bzw. Quellwasser. Dieses Reservoir unterliegt im Gegensatz zu $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ keinen (oder kaum) jahreszeitlichen Schwankungen, sondern bildet ein Mittel aller, über das Jahr hinweg fallenden lokalen Niederschläge ab (Darling et al. 2003, Van Geldern et al. 2014). Das erklärt auch die Tatsache, dass keine Abhängigkeit von klimatischen Faktoren, wie Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit gefunden werden konnte, da das Grundwasser auch unabhängig von solchen „oberirdischen“ Faktoren ist. In der weiteren Auswertung und folgenden Modellrechnungen kann $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ also als weitestgehend konstant angesehen werden.

Tabelle 33 Tageszeiten: $\delta^{18}\text{O}$ -Verteilung, Mittelwerte, Normalverteilung und Test auf gleiche Mittelwerte. Sowohl die morgens, als auch nachmittags beprobten Wasserproben sind normalverteilt und unterscheiden sich nicht signifikant in ihren Mittelwerten.

Datensatz	Stich- proben- größe (n)	Mittelwert (‰)	Standard- abweichung (‰)	Normalverteilung (Shapiro-Wilk Test)
Morgens	12	-10.34	0.23	p = 0.91
Nachmittags	16	-10.27	0.56	p = 0.93
T-Test	p = 0.724			

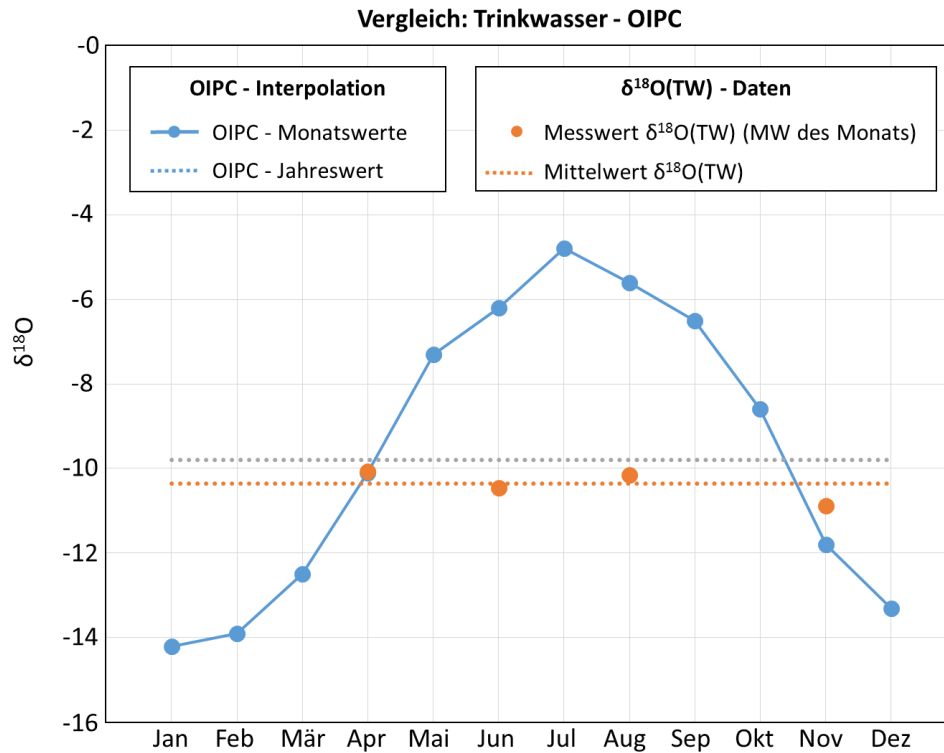


Abbildung 35 Vergleich der gemessenen $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ -Werte (Mittelwerte für den jeweiligen Monat) mit der monatlichen und Jahresschätzung nach OIPC.

Tabelle 63 im Anhang listet alle gemessenen Trinkwasserproben und die jeweiligen $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ -Ergebnisse auf.

2. Futter

Die Ergebnisse der Futterproben teilen sich in zwei verschiedene Gruppen auf: Trockenmasse ($\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$) und Futterwasser ($\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$). $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$ wurde nur bei solchen Futtertypen gemessen, die signifikante Mengen Wasser enthielten. Von Getreide und Stroh stehen demnach nur $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$ -Werte zur Verfügung. Eine Übersicht über alle Einzelmesswerte der Futterproben findet sich im Anhang (**Tabelle 64**).

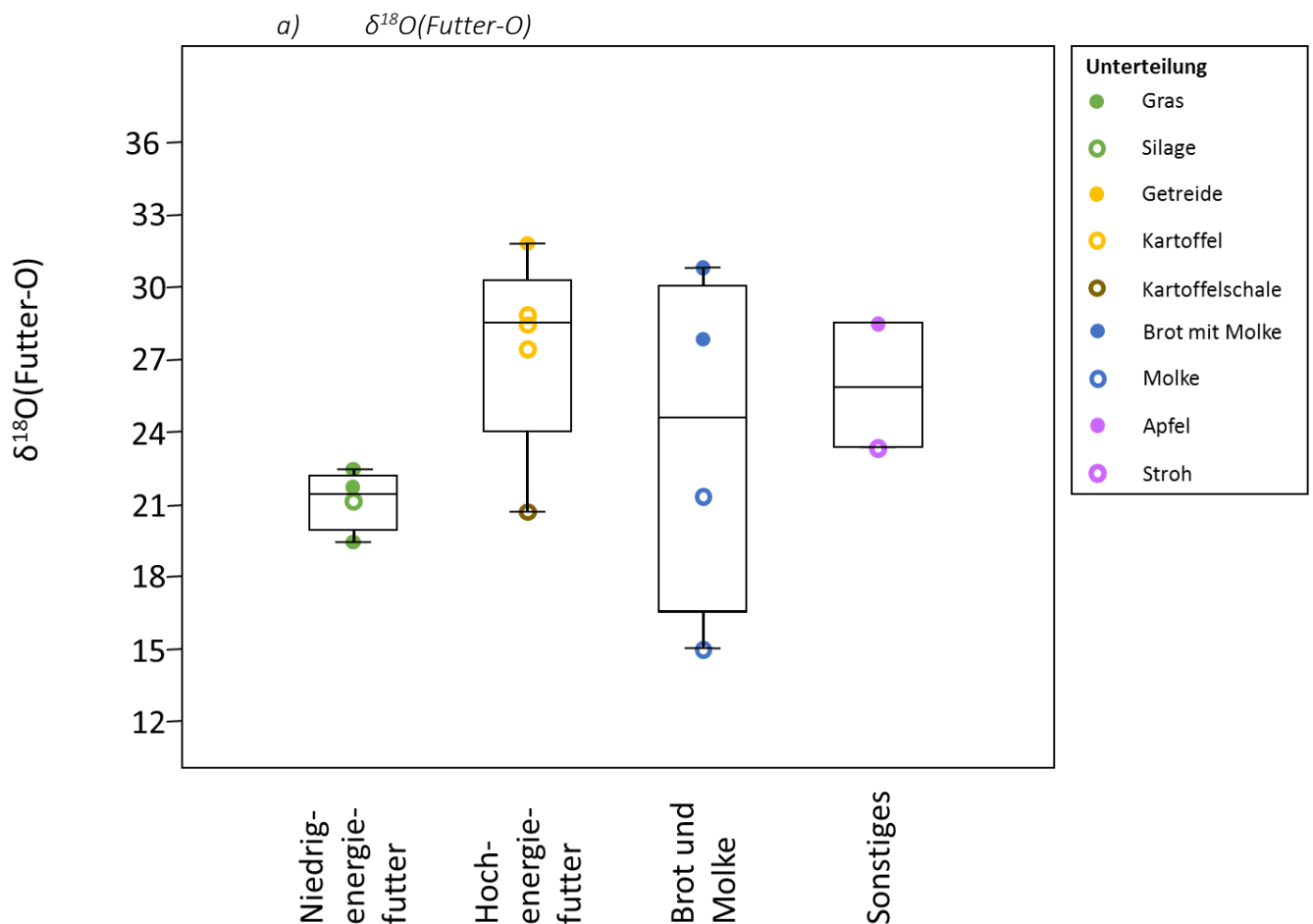


Abbildung 36 Boxplot der $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$ -Ergebnisse (Trockenmasse), eingeteilt in Niedrigenergiefutter (Gras und Silage), Hochenergiefutter (Getreidemischung und Kartoffeln), Brot und Molke und Sonstiges (in vernachlässigbaren Mengen konsumiert). Die Einzelmesswerte sind als Punkte markiert und weiter unterteilt.

Von allen gemessenen $\delta^{18}\text{O}$ -Proben des Experimentes, erreichen die $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$ -Proben die höchsten Werte. Diese Probengruppe ist auch in ihrer Bandbreite am größten, und das obwohl eine vergleichsweise geringe Stichprobengröße vorliegt ($n = 15$). **Abbildung 36** zeigt die Ergebnisse der $\delta^{18}\text{O}$ -Messungen an der Futter-Trockenmasse. Die Proben wurden (genau wie bei der Strontiumisotopenanalyse) in vier Kategorien aufgeteilt: Niedrigenergiefutter (bestehend aus Gras und Silage), Hochenergiefutter (bestehend aus Getreidemischung und Kartoffeln), Brot und Molke (welche gemeinsam, aber nur in geringen Mengen gefüttert wurden) und sonstigen potentiellen Futterquellen (Apfel und Stroh). Letztere wurden, wenn überhaupt nur in vernachlässigbaren Mengen von den Testindividuen konsumiert. Die Werte der übrigen drei (Haupt-)Kategorien weichen alle nicht signifikant von der Normalverteilung ab (siehe **Tabelle 34**). Die große Streuung innerhalb der Kategorie „Brot und Molke“ ist darauf zurückzuführen, dass die zwei untersten Messwerte lediglich die Molke darstellen, während die beiden oberen Werte der Mischung aus Brot und Molke entsprechen, wie sie den Tieren gefüttert wurde. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte für die Mischung beider liegen nahe an den Werten des Hochenergiefutters, was wohl auf den hohen Getreideanteil im Brot zurückzuführen ist.

Das Hochenergiefutter weist höhere Werte auf, als das Niedrigenergiefutter, beide unterscheiden sich in ihren Mittelwerten signifikant voneinander (siehe **Tabelle 35**). Der unterste Wert aus der Kategorie „Hochenergiefutter“ stellt die Schale einer der gefütterten Kartoffeln dar. Getrennt betrachtet scheint sie sich von der gesamten Kartoffel, sowie der Getreidemischung zu unterscheiden. Der Mittelwert der Kategorie „Brot und Molke“ hingegen unterscheidet sich nicht signifikant von den beiden anderen, auch dann nicht, wenn nur die beiden Werte der Mischung aus Brot und Molke herangezogen werden.

Das ist allerdings vermutlich auf die geringe Stichprobengröße zurückzuführen. Die Verteilung der Werte in **Abbildung 36** lässt vermuten, dass die Brot-Molke-Mischung isotopisch dem Hochenergiefutter ähnelt und sich vom Niedrigenergiefutter unterscheidet. Da sich die Werte des Hochenergiefutters signifikant von denen des Niedrigenergiefutters unterscheiden, muss in der späteren Interpretation der Ergebnisse auch der Futterwechsel im Verlauf der Mastzeit (Restriktion des Hochenergiefutters nach 12-14 Wochen) diskutiert werden. Die Werte der Kategorie „Sonstiges“ liegen innerhalb der Spanne der übrigen Werte, was ein Indiz dafür ist, dass die gesamte isotopische Spanne des im Verlauf der Studie verfügbaren Futters erfasst werden konnte. Für die folgenden Modellrechnungen wurden auch die extremsten Einzelwerte (z.B. nur Molke oder nur Getreide) als absolute Außengrenzen der möglichen Körperisotopenverhältnisse einbezogen.

Tabelle 34 $\delta^{18}\text{O}$ -Verteilung der Futter-Trockenmasse-Ergebnisse ($\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$) und Futter-Wasser-Ergebnisse ($\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$). Angegeben sind die Stichprobengrößen, Gesamtwertebereiche, Mittelwerte und Standardabweichungen der Gesamtstichprobe und der einzelnen Futtertypen (bei $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$). Alle Gesamt- und Teildatensätze sind normalverteilt (Shapiro-Wilk).

Datensatz	Stich- proben- größe (n)	Werte- bereich (‰)	Spanne (‰)	Mittel- wert (‰)	Standard- abweichung (‰)	Normalverteilung (Shapiro-Wilk Test)
Futter-O: Gesamt	15	15.03 31.82	16.80	24.61	4.83	p = 0.937
Brot mir Molke/ Molke	4	15.03 30.81	15.78	23.77	7.04	p = 0.957
Brot mit Molke	2	27.88 30.81	2.93	29.34	2.07	Stichprobe zu klein
Molke	2	15.03 21.37	6.34	18.20	4.49	Stichprobe zu klein
Gras/ Silage	4	19.55 22.43	2.88	21.22	1.23	p = 0.950
Getreide/ Kartoffel	5	20.75 31.82	11.07	27.49	4.10	p = 0.882
H₂O_{Futter}: Gesamt	5	-8.79 -5.29	3.50	-6.99	1.68	p = 0.836

Tabelle 35 Futterproben: Test auf gleiche Mittelwerte. T-Test für normalverteilte Datensätze, Mann-Whitney-Test für den Vergleich von Datensätzen, bei denen mindestens einer nicht normalverteilt ist. Signifikante Unterschiede sind rot markiert. Niedrigenergiefutter (Gras und Silage) und Hochenergiefutter (Getreidemischung und Kartoffel) unterscheiden sich signifikant, ebenso auch die Futter-Trockenmasse und das Futterwasser. Auch das Trinkwasser unterscheidet sich vom Futterwasser signifikant. Keine signifikanten Unterschiede konnten zwischen Brot und Molke und den anderen beiden Futterkategorien festgestellt werden.

T-Test	
Gras/Silage / Getreide/Kartoffel	p = 0.022
Brot/Molke / Gras/Silage	p = 0.502
Getreide/Kartoffel / Brot/Molke	p = 0.351
Futter-O / H₂O_{Futter}	p = 3.5 * 10⁻¹¹
Mann-Whitney	
H₂O_{Futter} / Trinkwasser	p = 0.001

$$b) \quad \delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$$

Vom Futterwasser konnten insgesamt nur fünf Proben gemessen werden. Sie liegen isotopisch leicht oberhalb des Trinkwassers und streuen deutlich weniger als die Trockenmasse, jedoch mehr als das Trinkwasser (siehe **Tabelle 34**). Auch die Stichprobe von $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$ weicht nicht signifikant von der Normalverteilung ab. Der Unterschied der Mittelwerte von $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$ (also dem im Futter enthaltenen Wasser und den entsprechenden organischen Bestandteilen) ist hochsignifikant, wie **Tabelle 35** zu entnehmen. Auch vom Trinkwasser unterscheidet sich das im Futter enthaltene Wasser signifikant.

Die ermittelten $\delta^{18}\text{O}$ -Werte für TW, Futter-O und $\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}}$ wurden für die spätere Modellierung des Körperwassers, Knochen- bzw. Zahnschmelzphosphates und der Borsten in den entsprechenden Modellrechnungen verwendet.

B. Schweine

Von den untersuchten Schweinen wurden in verschiedenen Lebensabschnitten Proben von unterschiedlichen Körpergeweben genommen und analysiert. **Abbildung 37** gibt einen Überblick aller Messergebnisse, die für die verschiedenen Individuen ermittelt werden konnten. Von den vier adulten Tieren, die näher untersucht werden konnten (Ind. 3-6), wurden jeweils zwei Zähne (M1 = erster Dauermolar, M3 = dritter Dauermolar), vier Knochen (Pars petrosa = Felsenbein, Mandibel = Unterkiefer, Femur = Oberschenkel, Mittelfußknochen bzw. Phalanges), fünf Weichgewebe (Laufmuskel = mit dem Femur assoziiert, Kaumuskel = Musculus masseter, Herzmuskel, Leber, Niere), sowie jeweils eine Borstenprobe bezüglich $\delta^{18}\text{O}$ analysiert. Bei den Weichgeweben wurde für jede Probe sowohl der $\delta^{18}\text{O}$ -Wert des Gewebswassers ($\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$), als auch der Wert der organischen Trockenmasse ($\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$) bestimmt. Von den frühzeitig verstorbenen Ferkeln (Ind. 1-2) wurden dieselben Knochen (außer den Fußknochen), sowie die Milchzähne gemessen.

Bei den Weichgeweben konnte von den Individuen 1 und 2 nur der Laufmuskel, jedoch keine anderen Muskeln und inneren Organe gemessen werden. Zusätzlich stehen $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ -Messergebnisse von Borsten zur Verfügung, die von lebenden Ferkeln entnommen wurden. Sie sind zwischen den verstorbenen Ferkeln (Ind. 1-2) und den adulten Schweinen (Ind. 3-6) separat aufgeführt, da sie keinem dieser Individuen zugeordnet werden können. In **Abbildung 37** zeigt sich bereits, dass die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte sowohl zwischen verschiedenen Individuen, aber auch innerhalb ein und desselben Individuums, je nach Probentyp stark voneinander abweichen. Hierauf soll in den folgenden Abschnitten zu den einzelnen Proben- und Gewebetypen näher eingegangen werden.

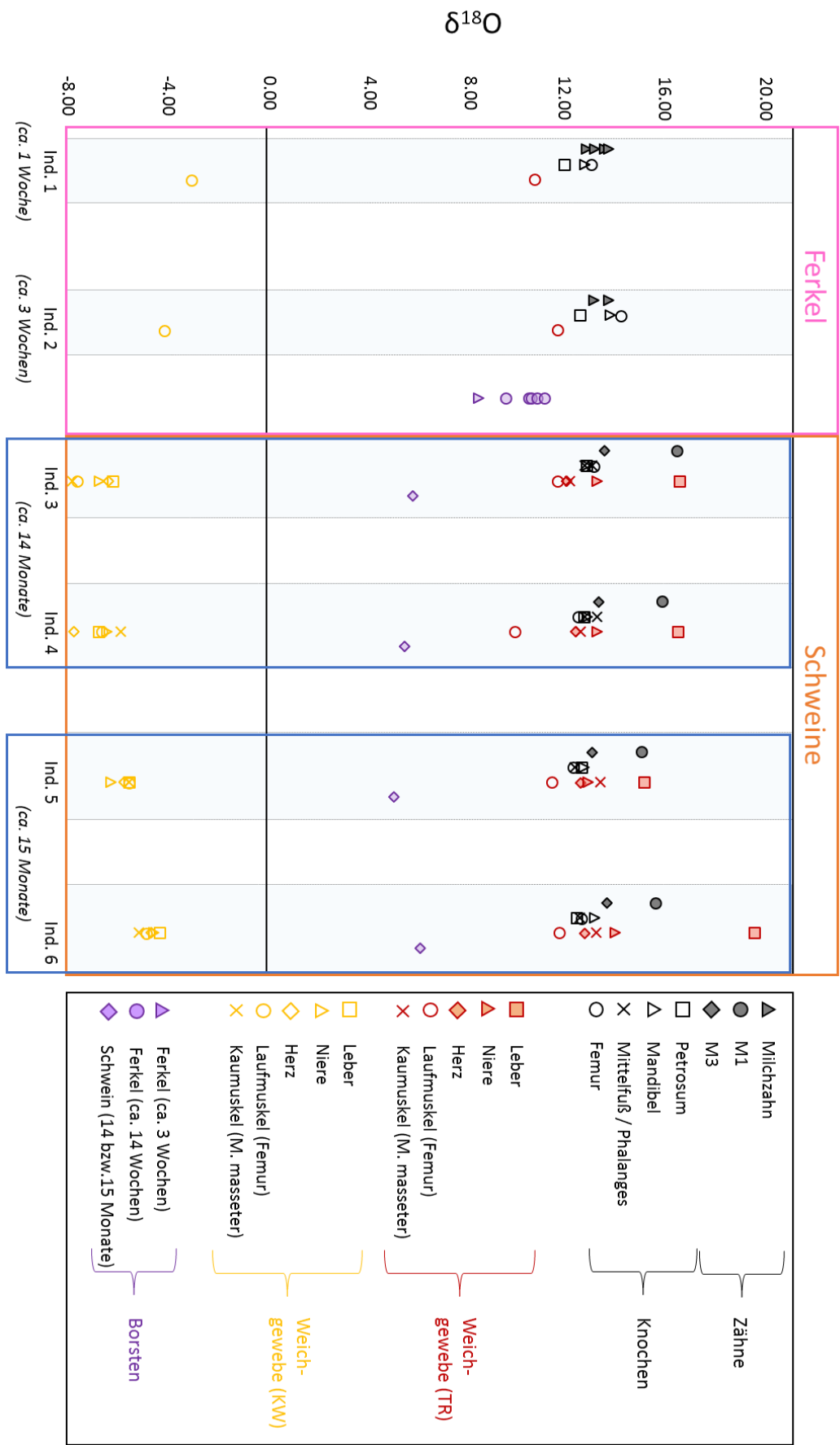


Abbildung 37 Gesamtübersicht über die $\delta^{18}\text{O}$ -Ergebnisse für die verschiedenen Schweineproben, aufgeteilt nach Individuen.

1. Weichgewebe

Tabelle 65 im Anhang enthält sämtliche $\delta^{18}\text{O}$ -Einzelmesswerte für $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$. Die Weichgewebe lassen sich entweder nach Gewebetyp oder nach Individuum einteilen. Wie schon beim Futter, weicht auch das $\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnis des in den Weichgeweben enthaltenen Körperwassers sehr signifikant und konsistent von der zugehörigen Trockenmasse ab ($p = 1.4 \cdot 10^{-8}$, Mann-Whitney, vergleiche auch **Tabelle 36** bzw. **Tabelle 38** und **Tabelle 40** bzw. **Tabelle 42**). Die beiden Fraktionen desselben Gewebes spiegeln also sehr unterschiedliche isotopische Aspekte des Körpers wider und werden im Folgenden getrennt voneinander vorgestellt.

a) Körperwasser

Von den sechs Testindividuen konnten insgesamt 22 $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Werte gemessen werden, 20 davon von den vier adulten Individuen. Die Gesamtheit aller gemessenen Körperwasserproben weicht in der Verteilung ihrer $\delta^{18}\text{O}$ -Werte nicht signifikant von einer Normalverteilung ab (**Tabelle 36** bzw. **Tabelle 38**).

Teilt man die Ergebnisse der $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Messung nach dem jeweiligen Individuum ein, wie in **Abbildung 38** oder nach dem Beprobungszeitraum (Ferkel, 1. Schlachtung, 2. Schlachtung), wie in **Tabelle 36**, zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen Individuen und Zeiträumen. Wie **Tabelle 36** zu entnehmen sind auch die Teildatensätze der vier adulten Individuen (3-6), sowie der der ersten (Ind. 3-4) und zweiten (Ind. 5-6) Schlachtung, jeweils nicht signifikant von einer Normalverteilung abweichend. Die Werte der ersten Schlachtung liegen insgesamt niedriger als die der zweiten, welche einen Monat später stattfand. Die Streuung der Werte (Spannen und Standardabweichungen) sind für erste und zweite Schlachtung hingegen fast identisch. Die Mittelwerte von erster und zweiter Schlachtung unterscheiden sich hochsignifikant (siehe **Tabelle 37**).

Auch die Ferkel sind sowohl von allen adulten Schweinen, als auch von den einzelnen Schlachtungen signifikant verschieden. Sie weisen die höchsten $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Werte auf. Da für die beiden Ferkel jeweils nur ein Messwert zur Verfügung steht, konnte hier nicht auf signifikante Unterschiede in $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ getestet werden. Obwohl beide Proben vom selben Gewebetyp stammen (Laufmuskel), liegen 1.11 ‰ zwischen dem jüngeren und dem älteren Individuum. Für die adulten Tiere konnten die Mittelwerte der Einzelindividuen desselben Schlachttags miteinander verglichen werden: Innerhalb von Schlachtung 1 gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen Individuum 3 und 4. Anders verhält es sich bei der zweiten Schlachtung, bei der sich der Mittelwert des Körperwassers von Individuum 5 signifikant von dem von Individuum 6 unterscheidet. Bei diesen beiden, zuletzt geschlachteten Tieren sind auch die Wertespanssen und Standardabweichungen nur halb so groß, wie bei den beiden, einen Monat zuvor geschlachteten. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des Körperwassers über die Zeit hinweg bzw. zwischen verschiedenen (gleichzeitig beprobten) Individuen unterscheiden.

Ergebnisse (Sauerstoff)

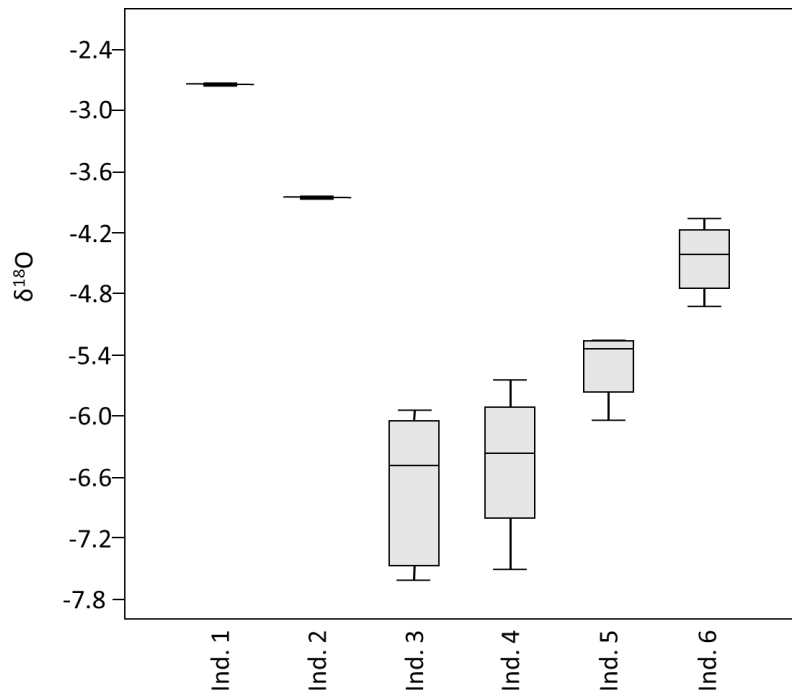


Abbildung 38 $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Ergebnisse der Weichgewebe, aufgeteilt nach Individuen (1-6). Die Isotopenverhältnisse der beiden jüngsten Individuen liegen am höchsten, die der ersten Schlachtung am niedrigsten.

Tabelle 36 $\delta^{18}\text{O}$ -Verteilung der Gewebswasser-Ergebnisse ($\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$), aufgeteilt nach Beprobungszeiträumen bzw. Individuen. Angegeben sind die Stichprobengrößen, Gesamtwertebereiche, Mittelwerte und Standardabweichungen der Gesamtstichprobe und der einzelnen Untergruppen. Alle Gesamt- und Teildatensätze sind normalverteilt, außer die $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Werte von Individuum 5 und die der Ferkel, für welche keine ausreichend große Stichprobe zur Verfügung stand (Shapiro-Wilk). Signifikante Abweichungen von der Normalverteilung sind rot markiert.

Datensatz	Stich- proben- größe (n)	Werte- bereich (‰)	Spanne (‰)	Mittel- wert (der MW der Individuen) (‰)	Standard- abweichung (der MW der Indi- viduen) (‰)	Normalverteilung (Shapiro-Wilk Test)
Gesamt	22	-7.61 -2.74	4.87	-4.95	1.55	p = 0.862
Ferkel (Ind. 1 und 2)	2	-3.85 -2.74	1.11	-3.30	0.78	Stichprobe zu klein
Schweine (Ind. 3-6)	20	-7.61 -4.07	3.54	-5.78	1.04	p = 0.596
1. Schlach- tung (Ind. 3 und 4)	10	-7.61 -5.65	1.96	-6.58	0.68	p = 0.206
Ind. 3	5	-7.61 -5.95	1.66	-6.71	0.74	p = 0.399
Ind. 4	5	-7.52 -5.65	1.87	-6.45	0.68	p = 0.604
2. Schlach- tung (Ind. 5 und 6)	10	-4.07 -6.04	1.97	-4.97	0.62	p = 0.745
Ind. 5	5	-6.04 -5.27	0.77	-5.49	0.32	p = 0.041
Ind. 6	5	-4.93 -4.07	0.86	-4.46	0.32	p = 0.941

Tabelle 37 Körperwasserproben nach Beprobungszeiträumen bzw. Individuen: Test auf gleiche Mittelwerte. T-Test für normalverteilte Datensätze, Mann-Whitney-Test für den Vergleich von Datensätzen, bei denen mindestens einer nicht normalverteilt ist. Signifikante Unterschiede sind rot markiert. Die Mittelwerte aller getesteten Datensätze unterscheiden sich signifikant, außer Individuum 3 und Individuum 4.

Mann-Whitney	
Ferkel / Schweine	$p = 0.026$
Ferkel / 1. Schlachtung	$p = 0.041$
Ferkel / 2. Schlachtung	$p = 0.041$
Ind. 5 / Ind. 6	$p = 0.012$
T-Test	
1. Schlachtung / 2. Schlachtung	$p = 3.2 \cdot 10^{-5}$
Ind. 3 / Ind. 4	$p = 0.567$

Werden die $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Ergebnisse nicht nach Individuum bzw. Zeitraum, sondern nach Gewebetyp eingeteilt, zeigt sich ein völlig anderes Bild, wie in **Abbildung 39** zu sehen ist. Die einzelnen Gewebetypen lassen sich bezüglich ihrer $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Werte nicht erkennbar unterscheiden. Das trifft besonders dann zu, wenn die beiden Werte, die von den Laufmuskeln der infantilen Individuen 1 und 2 stammen (im Graphen rot eingefärbt), nicht berücksichtigt und somit nur die Werte der adulten Tiere betrachtet werden. Für die anderen Gewebetypen stehen keine Körperwasser-Werte für die Ferkel zur Verfügung, weswegen sie in der folgenden, gewebespezifischen Auswertung (**Tabelle 38** und **Tabelle 39**) ausgeschlossen wurden: Sowohl die Mittelwerte der einzelnen Gewebegruppen, als auch die Standardabweichungen und Wertespannen ähneln sich sehr stark (siehe **Tabelle 38**). Die $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Werte aller einzelnen Gewebe weichen nicht signifikant von einer Normalverteilung ab. Dasselbe gilt auch, wenn man mehrere Gewebe zu funktionellen Gruppen zusammenfasst, indem zum Beispiel alle Muskelgewebe, oder alle Organe kombiniert werden. Eine statistische Überprüfung mittels T-Test bestätigt, dass sich die Mittelwerte der Teildatensätze nicht signifikant voneinander unterscheiden, egal ob einzelne Gewebetypen, oder größere Teildatensätze, wie „Muskelgewebe“ (Lauf-, Kau- und Herzmuskel) und „Stoffwechselorgane“ (Leber und Niere) oder „Muskeln ohne Herz“ (Lauf- und Kaumuskel) und „Organe“ (Herz, Leber und Niere) miteinander verglichen werden. Die stabilen Sauerstoffisotopenverhältnisse des Körperwassers zeigen also keine gewebespezifischen Unterschiede, sehr wohl aber zeitliche bzw. individuelle.

Ergebnisse (Sauerstoff)

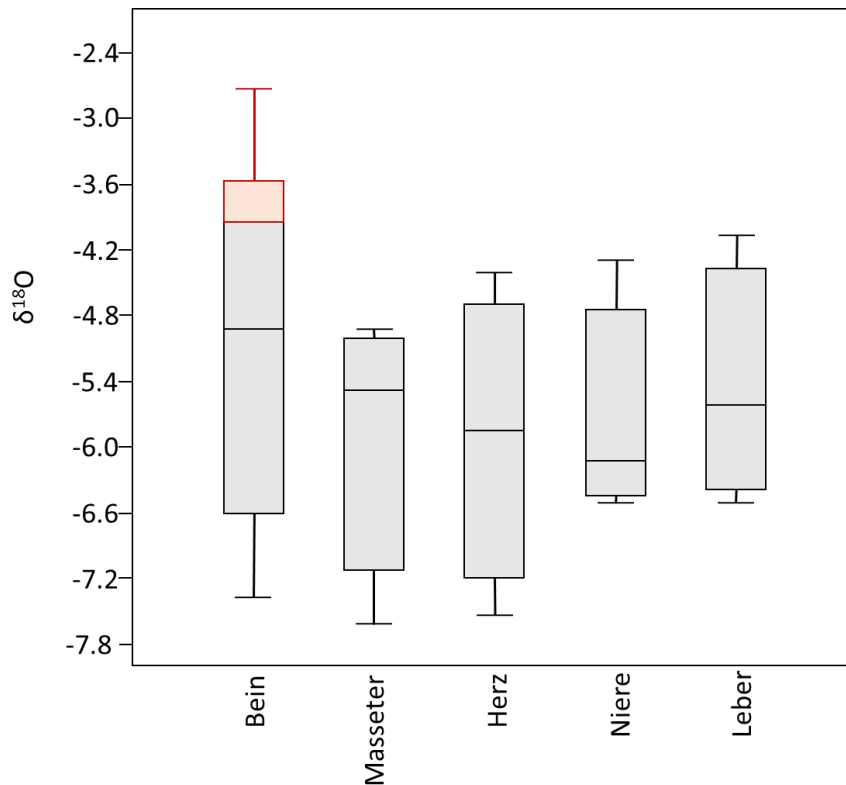


Abbildung 39 $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Ergebnisse der Weichgewebe, aufgeteilt nach Gewebetypen. Nur für den Laufmuskel („Bein“) standen Werte der beiden Ferkel (Ind. 1-2) zur Verfügung (rot markiert). Alle Gewebe ähneln sich stark in ihrer $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Verteilung.

Tabelle 38 $\delta^{18}\text{O}$ -Verteilung der Gewebswasser-Ergebnisse ($\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$) adulter Individuen (3-6), aufgeteilt nach Gewebetypen bzw. Gewebegruppen. Angegeben sind die Stichprobengrößen, Gesamtwertebereiche, Mittelwerte und Standardabweichungen der Gesamtstichprobe und der einzelnen Untergruppen. Alle Gesamt- und Teildatensätze sind normalverteilt (Shapiro-Wilk). Die beiden $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Werte von Ind. 1 und 2 (Laufmuskel) wurden nicht berücksichtigt, da von diesen Individuen keine Werte für die anderen Gewebetypen zur Verfügung standen.

Datensatz	Stich- proben- größe (n)	Werte- bereich (‰)	Spanne (‰)	Mittel- wert (‰)	Standard- abweichung (‰)	Normalverteilung (Shapiro-Wilk Test)
Gesamt	20	-7.61 -4.07	3.54	-5.78	1.04	p = 0.596
Muskelgewebe (Lauf-, Kau- und Herz-muskel)	12	-7.61 -4.41	3.20	-5.89	1.12	p = 0.247
Muskelgewebe (ohne Herz)	8	-7.61 -4.57	3.04	-5.89	1.12	p = 0.328
Laufmuskel	4	-7.36 -4.57	2.79	-5.90	1.22	p = 0.897
Kaumuskel	4	-7.61 -4.93	2.68	-5.88	1.19	p = 0.210
Herzmuskel	4	-7.52 -4.41	3.11	-5.90	1.30	p = 0.982
Organe (Herz, Leber, Niere)	12	-7.52 -4.07	3.45	-5.70	1.03	p = 0.505
Stoffwechsel- organe (Leber, Niere)	8	-6.50 -4.07	2.43	-5.61	0.96	p = 0.090
Niere	4	-6.50 -4.31	2.19	-5.76	0.99	p = 0.108
Leber	4	-6.50 -4.07	2.43	-5.45	1.05	p = 0.821

Tabelle 39 Körperwasserproben nach Gewebetypen bzw. -gruppen: T-Test auf gleiche Mittelwerte. Die Mittelwerte aller getesteten Datensätze sind nicht signifikant verschieden. Die beiden $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Werte von Ind. 1 und 2 (Laufmuskel) wurden nicht berücksichtigt, da von diesen Individuen keine Werte für die anderen Gewebetypen zur Verfügung standen.

T-Test	
Muskelgewebe (Lauf-, Kau-, Herz-) / Stoffwechselorgane (Leber, Niere)	p = 0.562
Muskelgewebe (Lauf-, Kau-, Herz-) / Niere	p = 0.842
Muskelgewebe (Lauf-, Kau-, Herz-) / Leber	p = 0.498
Muskelgewebe (ohne Herz) / Herz	p = 0.989
Muskelgewebe (ohne Herz) / Stoffwechselorgane (Leber, Niere)	p = 0.596
Muskelgewebe (ohne Herz) / Niere	p = 0.854
Muskelgewebe (ohne Herz) / Leber	p = 0.527
Kaumuskel / Herz	p = 0.985
Niere / Leber	p = 0.677
Kaumuskel / Stoffwechselorgane (Leber, Niere)	p = 0.673
Kaumuskel / Niere	p = 0.884
Kaumuskel / Leber	p = 0.605
Herz / Stoffwechselorgane (Leber, Niere)	p = 0.665
Herz / Niere	p = 0.874
Herz / Leber	p = 0.609
Laufmuskel / Kaumuskel und Herz	p = 0.993
Laufmuskel / Kaumuskel	p = 0.987
Laufmuskel / Herz	p = 0.998
Laufmuskel / Stoffwechselorgane (Leber, Niere)	p = 0.660
Laufmuskel / Niere	p = 0.872
Laufmuskel / Leber	p = 0.598
Muskelgewebe (ohne Herz) / Organe (Herz, Leber, Niere)	p = 0.708
Kaumuskel / Organe (Herz, Leber, Niere)	p = 0.778
Laufmuskel / Organe (Herz, Leber, Niere)	p = 0.761

b) Trockenmasse

$\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ wurde an denselben 22 Proben gemessen, wie $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$. Im Gegensatz zu den Körperwasserproben weicht die Gesamtstichprobe hier, sowohl mit den beiden Proben der Ferkel, als auch nur die der vier adulten Tiere, signifikant von der Normalverteilung ab (siehe **Tabelle 40** und **Tabelle 41**). Auch die Daten der zweiten Schlachtung sind aufgrund des Leberwertes von Individuum 6 nicht normalverteilt. Die Verteilung der $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Daten streut über eine fast doppelt so große Spanne wie $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$.

Auch für $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ wurden die Messdaten einerseits nach Zeiträumen und Individuen und andererseits nach Gewebetypen (ohne Ferkel) eingeteilt.

Abbildung 40 zeigt die Trockenmassewerte nach Individuen. Augenscheinlich unterscheiden sich die vier adulten Individuen nicht eindeutig voneinander, was auch der Test auf gleiche Mittelwerte für den Vergleich der ersten und zweiten Schlachtung bestätigt (**Tabelle 41**). Die Werte der beiden Ferkel (Mittelwert = 11.48) scheinen unterhalb der adulten Werte (Mittelwert = 13.61) zu liegen (**Tabelle 40**). Wie **Tabelle 41** zu entnehmen ist dieser Unterschied allerdings ebenfalls nicht signifikant, was auch der geringen Stichprobengröße bei den Ferkeln geschuldet sein kann. Der p-Wert für den Vergleich des Mittelwertes der Ferkel mit den Schweinen und der für den Vergleich der Ferkel mit Schlachtung 2 liegt allerdings trotz der geringen Stichprobe sehr nahe an der Signifikanzgrenze. Dennoch lässt sich für die geschlachteten Individuen 3 bis 6 sagen, dass sie sich in ihrer $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Verteilung nicht nach Individuum bzw. Beprobungszeitraum unterscheiden lassen, wie es bei den dazugehörigen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Werten der Fall ist.

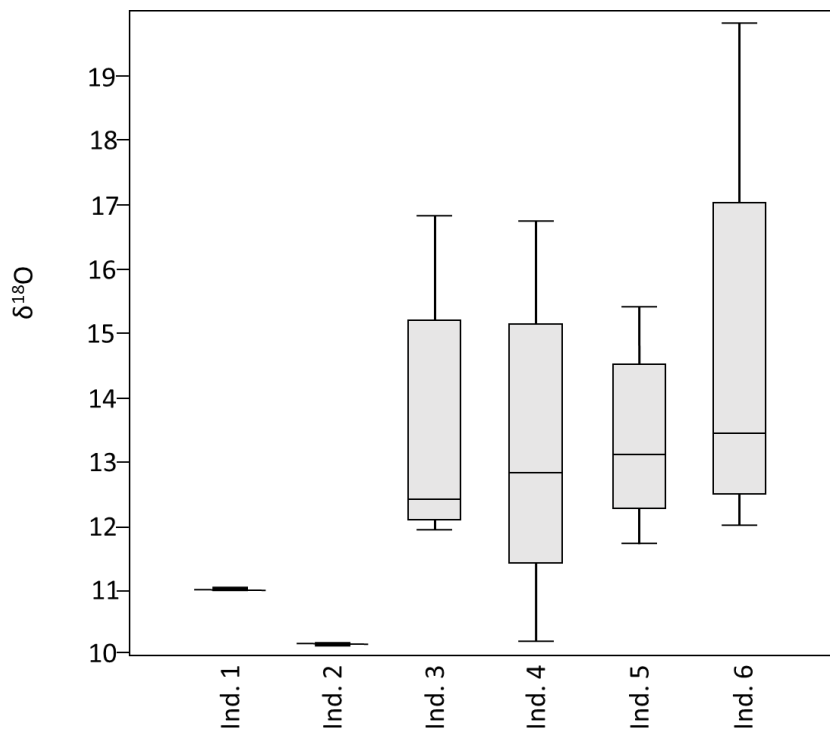


Abbildung 40 $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Ergebnisse der Weichgewebe, aufgeteilt nach Individuen (1-6). Die Isotopenverhältnisse der beiden jüngsten Individuen liegen am niedrigsten (zusammen mit dem Laufmuskel von Individuum 4), die der adulten Individuen insgesamt höher. Die adulten Individuen und die beiden Schlachtungen scheinen sich nicht systematisch zu unterscheiden.

Tabelle 40 $\delta^{18}\text{O}$ -Verteilung der Gewebe-Trockenmasse-Ergebnisse ($\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$), aufgeteilt nach Beprobungszeiträumen bzw. Individuen. Angegeben sind die Stichprobengrößen, Gesamtwertebereiche, Mittelwerte und Standardabweichungen der Gesamtstichprobe und der einzelnen Untergruppen. Alle Gesamt- und Teildatensätze sind nicht normalverteilt, außer die $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Werte der ersten Schlachtung (Shapiro-Wilk). Von den Ferkeln (Ind. 1-2) stand keine ausreichend große Stichprobe für einen Test auf Normalverteilung zur Verfügung. Signifikante Abweichungen von der Normalverteilung sind rot markiert.

Datensatz	Stich- proben- größe (n)	Werte- bereich (‰)	Spanne (‰)	Mittel- wert (der MW der Indivi- duen) (‰)	Standard- abweichung (der MW der Indi- viduen) (‰)	Normalverteilung (Shapiro-Wilk Test)
Gesamt	22	10.18 19.84	9.66	12.53	1.16	$p = 0.008$
Ferkel (Ind. 1 und 2)	2	11.02 (1) 11.94 (2)	0.92	11.48	0.65	Stichprobe zu klein
Schweine (Ind. 3-6)	20	10.21 19.84	9.63	13.61	2.17	$p = 0.011$
1. Schlachtung (Ind. 3 und 4)	10	10.21 16.84	6.63	13.29	2.07	$p = 0.103$
2. Schlachtung (Ind. 5 und 6)	10	11.72 19.84	8.12	13.93	2.33	$p = 0.008$ (Leber von 6* Ausreißer)

Tabelle 41 Trockenmasseproben nach Beprobungszeiträumen: Mann-Whitney-Test auf gleiche Mittelwerte. Die Mittelwerte aller getesteten Datensätze unterscheiden sich nicht signifikant, der Unterschied zwischen den Ferkeln und den Schweinen, sowie zwischen den Ferkeln und der zweiten Schlachtung, liegt allerdings nah an der Signifikanzgrenze, trotz einer geringen Stichprobe bei den Ferkeln.

Mann-Whitney	
Ferkel / Schweine	$p = 0.06$
1. Schlachtung / 2. Schlachtung	$p = 0.43$
Ferkel / 1. Schlachtung	$p = 0.11$
Ferkel / 2. Schlachtung	$p = 0.07$

Ein gegensätzlicher Trend bei $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ im Vergleich zu $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ lässt sich entsprechend auch feststellen, wenn man die Daten nicht nach Individuen bzw. Zeiträumen, sondern nach Gewebetypen gruppiert (wobei wie zuvor bei $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ die Daten der Ferkel ausgeschlossen werden, da sie nur für einen Gewebetyp zur Verfügung stehen). In **Abbildung 41** ist bereits zu erkennen, dass sich die verschiedenen Gewebe erheblich in den Sauerstoffisotopenverhältnissen ihrer Trockenmasse unterscheiden. Vor allem die Werte der Leberproben weichen deutlich nach oben hin ab, die der Laufmuskelproben dagegen nach unten. Die Gesamtheit der Proben ist laut Shapiro-Wilk-Test nicht normalverteilt, die einzelnen Gewebetypen hingegen weichen, mit Ausnahme der Laufmuskeln, nicht signifikant von der Normalverteilung ab. Fügt man die beiden Werte der ausgeschlossenen Individuen 1 und 2 zum Datensatz der Laufmuskeln hinzu, liegt wiederum eine Normalverteilung vor.

Auch die Teildatensätze „Muskelgewebe“ (Lauf-, Kau- und Herzmuskel), „Muskelgewebe ohne Herz“ (Lauf- und Kaumuskel) und „Stoffwechselorgane“ (Niere und Leber) sind laut Shapiro-Wilk normalverteilt. Die Gruppe „Organe“ (Herz, Leber und Niere) hingegen weicht in der Verteilung ihrer $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Werte signifikant von der Normalverteilung ab, was vermuten lässt, dass die (isotopische) Zuordnung des Herzgewebes zu den Muskelgeweben sinnvoller ist als die Zuordnung zu den inneren

Organen. In **Tabelle 43** sind die Ergebnisse der Tests auf gleiche Mittelwerte zwischen den verschiedenen Gewebetypen und –gruppen aufgeführt (T-Test für normalverteilte Datensätze, Mann-Whitney Test für Datensätze, die nicht normalverteilt sind). Von den einzelnen Gewebetypen unterscheiden sich alle signifikant voneinander, außer Kaumuskel und Herz und Kaumuskel und Niere. Auch wenn man die Daten in die zwei Gruppen „Muskelgewebe“ und „Stoffwechselorgane“ zusammenfasst, ergeben sich hochsignifikante Unterschiede zwischen den beiden Datensätzen. Am stärksten unterscheidet sich das Lebergewebe von den übrigen. Auch Kau- und Laufmuskel sind signifikant verschieden. Kau- und Laufmuskel unterscheiden sich zusammengefasst allerdings nicht signifikant vom Herzgewebe, was die mögliche Gruppierung der drei Gewebe unterstützt. Von den Stoffwechselorganen Leber und Niere unterscheidet sich das Herz signifikant, was gegen eine aus allen inneren Organen bestehende Gruppe spricht. Die Gruppe „Stoffwechselorgane“ ist allerdings auch nicht einheitlich, da auch Leber und Niere sich signifikant voneinander unterscheiden.

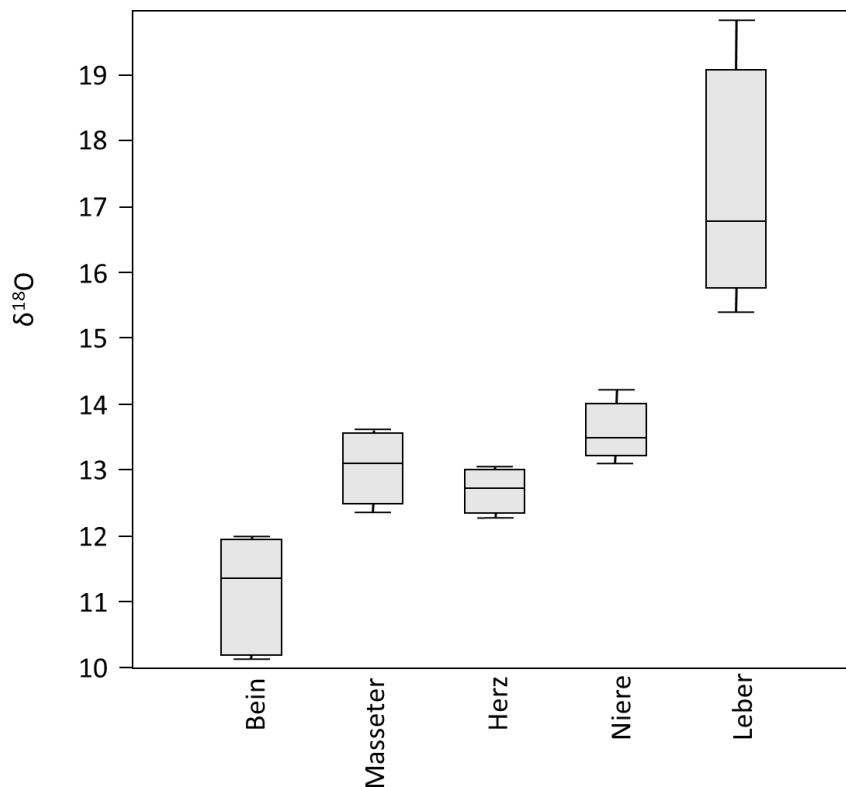


Abbildung 41 $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Ergebnisse der Weichgewebe, aufgeteilt nach Gewebetypen. Nur für den Laufmuskel („Bein“) standen Werte der beiden Ferkel (Ind. 1-2) zur Verfügung, weswegen diese ausgeschlossen wurden. Die Gewebe unterscheiden sich sichtbar in ihrer $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Verteilung. Am größten ist der Unterschied beim Lebergewebe und den Laufmuskeln zu erkennen.

Tabelle 42 $\delta^{18}\text{O}$ -Verteilung der Gewebe-Trockenmasse-Ergebnisse ($\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$) adulter Individuen (3-6), aufgeteilt nach Gewebetypen bzw. Gewebegruppen. Angegeben sind die Stichprobengrößen, Gesamtwertebereiche, Mittelwerte und Standardabweichungen der Gesamtstichprobe und der einzelnen Untergruppen. Der Gesamtdatensatz weicht signifikant von der Normalverteilung ab. Die einzelnen Teildatensätze sind normalverteilt, mit Ausnahme der Laufmuskeln und der Gruppe „Organe“ (Herz, Leber, Niere) (Shapiro-Wilk). Die beiden $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Werte von Ind. 1 und 2 (Laufmuskel) wurden nicht berücksichtigt, da von diesen Individuen keine Werte für die anderen Gewebetypen zur Verfügung standen.

Datensatz	Stich- proben- größe (n)	Werte- bereich (‰)	Spanne (‰)	Mittel- wert (‰)	Standard- abweichung (‰)	Normalverteilung (Shapiro-Wilk Test)
Gesamt	20	10.21 19.84	9.63	13.61	2.17	$p = 0.011$
Muskelgewebe (Lauf-, Kau- und Herz- muskel)	12	10.21 13.62	3.41	12.42	0.91	$p = 0.287$
Muskelgewebe (ohne Herz)	8	10.21 13.62	3.41	12.27	1.09	$p = 0.608$
Laufmuskel	4	10.21 12.01	1.80	11.47	0.85	$p = 0.038$
Kaumuskel	4	12.39 13.62	1.23	13.07	0.57	$p = 0.605$
Herzmuskel	4	12.27 13.03	0.76	12.71	0.33	$p = 0.768$
Organe (Herz, Leber, Niere)	12	12.27 19.84	7.57	14.50	2.28	$p = 0.028$
Stoffwechsel- organe (Leber, Niere)	8	13.12 19.84	6.72	15.40	2.32	$p = 0.217$
Niere	4	13.12 14.23	1.10	13.58	0.46	$p = 0.438$
Leber	4	15.42 19.84	4.42	17.22	1.87	$p = 0.381$

Tabelle 43 Trockenmasseproben nach Gewebetypen bzw. -gruppen: T-Test auf gleiche Mittelwerte. Die Mittelwerte aller getesteten Datensätze sind signifikant verschieden, außer die von Herz und anderen Muskelgeweben, Herz und Kaumuskel und Kaumuskel und Niere. Der Unterschied zwischen Leber und anderen Gewebe(-gruppen) ist besonders signifikant. Die beiden $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Werte von Ind. 1 und 2 (Laufmuskel) wurden nicht berücksichtigt, da von diesen Individuen keine Werte für die anderen Gewebetypen zur Verfügung standen. Signifikante Unterschiede sind rot markiert.

T-Test	
Muskelgewebe (Lauf-, Kau-, Herz-) / Stoffwechselorgane (Leber, Niere)	$p = 0.0007$
Muskelgewebe (Lauf-, Kau-, Herz-) / Niere	$p = 0.030$
Muskelgewebe (Lauf-, Kau-, Herz-) / Leber	$p = 5.9 \cdot 10^{-6}$
Muskelgewebe (ohne Herz) / Herz	$p = 0.462$
Muskelgewebe (ohne Herz) / Stoffwechselorgane (Leber, Niere)	$p = 0.004$
Muskelgewebe (ohne Herz) / Niere	$p = 0.047$
Muskelgewebe (ohne Herz) / Leber	$p = 0.0002$
Kaumuskel / Herz	$p = 0.305$
Niere / Leber	$p = 0.009$
Kaumuskel / Stoffwechselorgane (Leber, Niere)	$p = 0.081$
Kaumuskel / Niere	$p = 0.213$
Kaumuskel / Leber	$p = 0.005$
Herz / Stoffwechselorgane (Leber, Niere)	$p = 0.047$
Herz / Niere	$p = 0.022$
Herz / Leber	$p = 0.003$
Mann-Whitney	
Laufmuskel / Kaumuskel und Herz	$p = 0.008$
Laufmuskel / Kaumuskel	$p = 0.030$
Laufmuskel / Herz	$p = 0.030$
Laufmuskel / Stoffwechselorgane (Leber, Niere)	$p = 0.008$
Laufmuskel / Niere	$p = 0.030$
Laufmuskel / Leber	$p = 0.030$
Muskelgewebe (ohne Herz) / Organe (Herz, Leber, Niere)	$p = 0.012$
Kaumuskel / Organe (Herz, Leber, Niere)	$p = 0.303$
Laufmuskel / Organe (Herz, Leber, Niere)	$p = 0.004$

Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von Körperwasser und Trockenmasse derselben Gewebe spiegeln also unterschiedliche Aspekte des körperlernen Sauerstoffkreislaufes wider. Während sich beim Körperwasser zeitliche und inter-individuelle Unterschiede erkennen lassen, jedoch keine intra-individuellen bzw. gewebespezifischen, verhält es sich bei der Trockenmasse genau umgekehrt: Hier lassen sich verschiedene Gewebetypen bzw. -gruppen (auch innerhalb desselben Individuums) unterscheiden, die Unterschiede zwischen den Beprobungszeiträumen sind dagegen, zumindest innerhalb der adulten, abgestellten Individuen nicht oder kaum vorhanden.

2. Borsten

Die einzelnen Messwerte der $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ -Ergebnisse finden sich in **Tabelle 67** im Anhang. Es konnten Borsten der vier adulten Testindividuen beprobt werden ($n = 4$), sowie Proben von lebenden Individuen des Testwurfes im Alter von ca. 3 Wochen ($n = 1$) und ca. 14 Wochen ($n = 5$). In **Abbildung 42** sind die Borstenproben in zwei Altersgruppen („Ferkel“ und „Schweine“) aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Proben der nicht-adulten Tiere im Alter von drei bis vierzehn Wochen höhere $\delta^{18}\text{O}$ -Werte aufweisen, als die der adulten Schweine. Dabei liegen die Werte der vierzehnwöchigen Tiere höher als die des dreiwöchigen Individuums. Auch die Mittelwerte und Wertespannen in **Tabelle 44** zeigen die Unterschiede zwischen den Altersgruppen. Die vier adulten Tiere hingegen scheinen sich nicht eindeutig bezüglich des Schlachtzeitpunktes voneinander zu unterscheiden. Die Altersgruppen, welche auf Normalverteilung getestet werden konnten, weichen alle nicht signifikant von dieser ab, die Zusammenfassung aller Werte hingegen schon. T-Test und Mann-Whitney-Test bestätigen, dass signifikante Unterschiede zwischen den Ferkeln und den adulten Schweinen existieren (egal ob das dreiwöchige Individuum ausgeschlossen wird, oder nicht), aber kein signifikanter Unterschied zwischen der ersten und der zweiten Schlachtung besteht (siehe **Tabelle 45**).

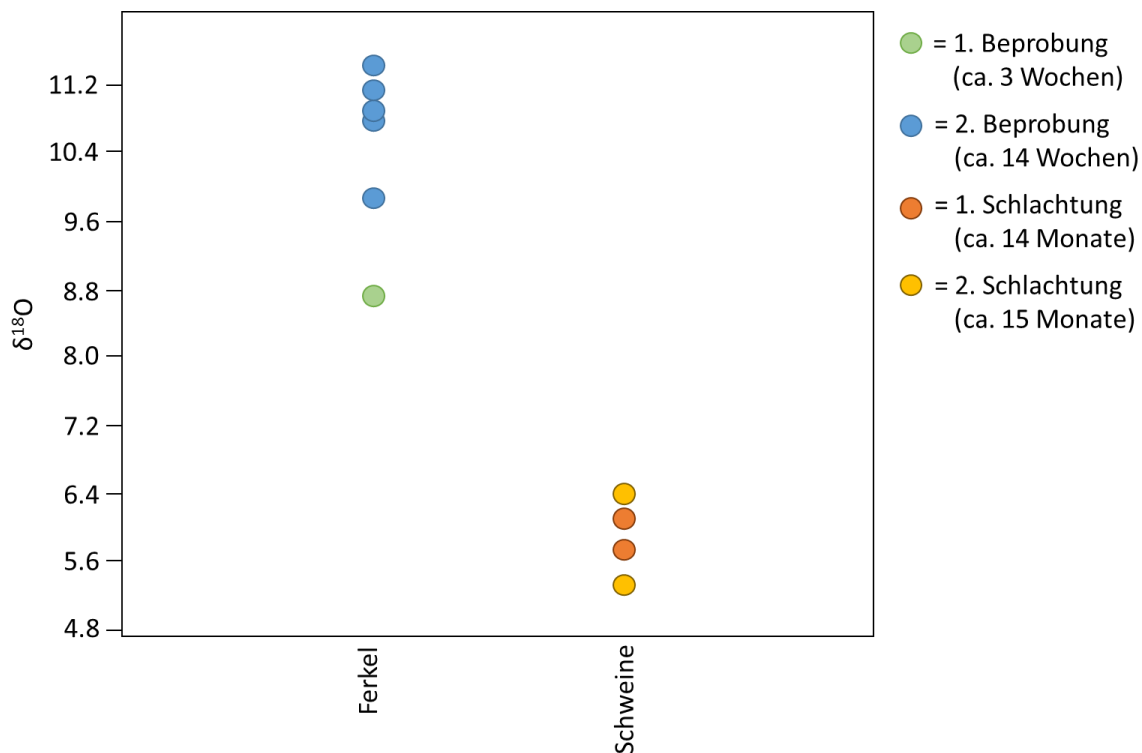


Abbildung 42 $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ -Ergebnisse nach groben Altersgruppen: Ferkel = 3 Wochen bzw. 14 Wochen; Schweine = 14 bzw. 15 Monate. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Ferkel liegen deutlich über den Werten der adulten Tiere, wobei die 14-wöchigen Tiere die höchsten Werte aufweisen.

Tabelle 44 $\delta^{18}\text{O}$ -Verteilung der Borsten-Ergebnisse ($\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$), aufgeteilt nach Altersgruppen. Angegeben sind die Stichprobengrößen, Gesamtwertebereiche, Mittelwerte und Standardabweichungen der Gesamtstichprobe und der einzelnen Untergruppen. Der Gesamtdatensatz weicht signifikant von der Normalverteilung ab, die einzelnen Teildatensätze hingegen sind normalverteilt (Shapiro-Wilk), sofern ein Test auf Normalverteilung möglich ist. Signifikante Abweichungen von der Normalverteilung sind rot gekennzeichnet.

Datensatz	Stich- proben- größe (n)	Werte- bereich (‰)	Spanne (‰)	Mittelwert (gewichtet) (‰)	Standard- abweichung (gewichtet) (‰)	Normal- verteilung (Shapiro- Wilk Test)
Gesamt	10	5.33 11.43	6.10	7.84	2.40	$p = 0.05$
Ferkel	6	8.73 11.43	2.70	9.78	1.48	$p = 0.243$
3 Wochen	1	8.73	<i>Einzelwert</i>			
14 Wochen	5	9.87 11.43	1.57	10.83	0.59	$p = 0.438$
Schweine	4	5.33 6.40	1.07	5.89	0.46	$p = 0.959$
1. Schlachtung	2	5.75 6.09	0.34	5.92	0.24	<i>Stichprobe zu klein</i>
2. Schlachtung	2	5.33 6.40	1.07	5.87	0.75	<i>Stichprobe zu klein</i>

Tabelle 45 Borstenproben nach Altersgruppen: T-Test auf gleiche Mittelwerte für normalverteilte Daten, Mann-Whitney Test für nicht-normalverteilte Daten. Ferkel und Schweine unterscheiden sich signifikant voneinander (sowohl mit dem dreiwöchigen Individuum, als auch ohne). Die Borsten der ersten Schlachtung (Ind. 3-4) unterscheiden sich nicht signifikant von denen der zweiten Schlachtung (Ind. 5-6) Signifikante Unterschiede sind rot markiert.

Mann-Whitney	
1. Schlachtung / 2. Schlachtung	$p = 0.699$
T-Test	
Ferkel / Schweine	$p = 3.0 \cdot 10^{-5}$
14 Wochen / Schweine	$p = 2.6 \cdot 10^{-6}$

3. Phosphat

Tabelle 66 im Anhang führt sämtliche Einzelmessergebnisse der $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Messungen an Knochen- und Zahnschmelzproben der untersuchten Individuen auf. Wie **Tabelle 46** zu entnehmen, weichen die einzelnen Knochen- und Zahntypen in ihrer Verteilung nicht signifikant von der Normalverteilung ab, die Gesamtheit aller Zahnschmelz- bzw. Knochenwerte jedoch schon, ebenso wie die Gesamtstichprobe aller $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Werte (Zahnschmelz und Knochen zusammengenommen). Auch die Wertespanssen und Standardabweichungen sind für die Gesamtstichproben jeweils deutlich größer, als für die einzelnen Probenotypen. In **Abbildung 43** sind die $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Ergebnisse der einzelnen untersuchten Zahntypen aufgetragen. Die Milchzähne stammen von den beiden Ferkeln, M1 und M3 von den vier adulten Tieren. Wie zu sehen ist, weichen die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der ersten Molaren

deutlich von den beiden anderen Zahntypen nach oben hin ab, während sich Milchzähne und dritte Molaren augenscheinlich nicht unterscheiden. Zähne, die (größtenteils) außerhalb der Stillphase mineralisieren sind die Milchzähne der Ferkel und die dritten Molaren der Schweine, die ersten Molaren hingegen mineralisieren nahezu vollständig während der Stillphase. Zusammengekommen weichen auch Milchzähne und M3 nicht signifikant von einer Normalverteilung ab. Dasselbe gilt allerdings auch für die Stichprobe aller Dauermolaren der Schweine (M1 und M3), oder die aller Zähne der ersten bzw. zweiten Schlachtung. Bei den jeweiligen Knochentypen (Pars petrosa, Mandibel oder Femur) gibt es keine signifikante Abweichung von der Normalverteilung, egal, ob die Knochen der Ferkel (Ind. 1-2) miteinbezogen werden, oder nur die adulten Schweine (Ind. 3-6) betrachtet werden. Auch alle Knochen der ersten und der zweiten Schlachtung zusammengekommen, sind jeweils normalverteilt. Genauso gibt es keine signifikante Abweichung von der Normalverteilung, wenn alle Knochen zusammengefasst werden, die (zumindest zum größten Teil) einen Zeitraum außerhalb der Stillphase repräsentieren (Ind. 1 und Ind. 3-6).

Werden alle Proben (Knochen und Zähne), die innerhalb der Stillphase mineralisierten gemeinsam betrachtet (M1 und Knochen von Ferkel 2), sind auch diese laut Shapiro-Wilk Test normalverteilt. Dasselbe gilt für die übrigen Probenotypen, welche nicht (oder nur teilweise) vom Stilleffekt betroffen sein sollten (Milchzähne, M3, Knochen von Ferkel 2 und Ind. 3-6). Zähne und Knochen sollten für die Analyse also jeweils weiter unterteilt werden, da offenbar Unterschiede zwischen den Geweben und Individuen bestehen, die vermutlich mit der Mineralisationszeit der jeweiligen Knochen- bzw. Zahntypen zusammenhängen.

Tabelle 46 $\delta^{18}\text{O}$ -Verteilung der Phosphat-Ergebnisse ($\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$), aufgeteilt nach Gewebetypen bzw. Gewebegruppen, Beprobungszeiträumen und in Abhängigkeit vom Mineralisationszeitraum. Angegeben sind die Stichprobengrößen, Gesamtwertebereiche, Mittelwerte und Standardabweichungen der Gesamtstichprobe und der einzelnen Untergruppen. Der Gesamtdatensatz weicht signifikant von der Normalverteilung ab, genauso wie die Gesamtheit aller Knochen und die aller Zähne. Die einzelnen Teildatensätze hingegen sind normalverteilt (Shapiro-Wilk). Signifikante Abweichungen von der Normalverteilung sind rot gekennzeichnet.

Datensatz	Stich- proben- größe (n)	Werte- bereich (‰)	Spanne (‰)	Mittelwert (gewichtet) (‰)	Standard- abweichung (gewichtet) (‰)	Normal- verteilung (Shapiro-Wilk Test)
Gesamt	38	12.20 16.72	4.52	13.76	0.88	$p = 9.7 \cdot 10^{-6}$
Zahnschmelz	14	13.06 16.72	3.66	14.42	0.70	$p = 0.01$
Milchzahn	6	13.06 13.97	0.91	13.60	0.08	$p = 0.346$
Molare (M1 und M3)	8	13.30 16.72	3.42	14.83	1.33	$p = 0.227$
M1	4	15.30 16.72	1.42	16.01	0.59	$p = 0.994$
M3	4	13.30 13.91	0.61	13.65	0.27	$p = 0.750$
Zähne ohne Stilleffekt (Milchzahn und M3)	10	13.06 13.97	0.91	13.63	0.21	$p = 0.291$
Zähne 1. Schlachtung (Ind. 3 und 4)	4	13.58 16.72	3.14	15.06	1.60	$p = 0.200$
Zähne 2. Schlachtung (Ind. 5 und 6)	4	13.30 15.87	2.57	14.59	1.19	$p = 0.622$
Knochen	24	12.20 14.52	2.32	13.09	0.37	$p = 0.016$
Pars petrosa	6	12.20 13.11	0.91	12.80	0.33	$p = 0.212$
Pars petrosa Schweine (Ind. 3-6)	4	12.70 13.11	0.41	12.94	0.17	$p = 0.453$
Mandibel	6	12.90 14.04	1.13	13.25	0.42	$p = 0.063$
Mandibel Schweine (Ind. 3-6)	4	12.90 13.40	0.50	13.11	0.21	$p = 0.584$
Femur	6	12.60 14.52	1.92	13.26	0.69	$p = 0.220$
Femur Schweine (Ind. 3-6)	4	12.60 13.40	0.80	12.93	0.34	$p = 0.556$
Mittelfuß/ Phalanges (Ind. 3-6)	6	12.60 13.49	0.89	12.95	0.30	$p = 0.885$

Fortsetzung Tabelle 46						
Knochen Ferkel (Ind. 1 und 2)	6	12.20 (1) 14.52 (2)	2.32	13.32	0.84	p = 0.910
Knochen Ferkel 1	3	12.20 13.32	1.12	12.84	0.58	p = 0.537
Knochen Ferkel 2	3	12.83 14.52	1.68	13.80	0.87	p = 0.533
Knochen Schweine (Ind. 3-6)	18	12.60 13.49	0.89	12.98	0.25	p = 0.451
Knochen 1. Schlachtung (Ind. 3 und 4)	10	12.80 13.49	0.69	13.11	0.18	p = 0.419
Knochen 2. Schlachtung (Ind. 5 und 6)	8	12.60 13.40	0.80	12.86	0.26	p = 0.164
Knochen ohne Stilleffekt (Ferkel 1 und Schweine (Ind. 3-6))	21	12.20 13.49	1.29	12.95	0.16	p = 0.480
Alles mit Stilleffekt (M1, Knochen Ferkel 2)	7	12.83 16.72	3.89	14.90	1.57	p = 0.867
Alles ohne Stilleffekt (Milchzahn, M3, Knochen Ferkel 1, Knochen Schweine)	31	12.20 13.97	1.77	13.32	0.40	p = 0.507

In **Tabelle 47** wurden die Teildatensätze auf gleiche Mittelwerte hin untersucht. Hier zeigt sich, dass die Gesamtheit aller Zahnproben im Mittel ihrer $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Verteilung sehr signifikant von der der Knochenproben abweicht. Bei den Zähnen bestehen signifikante Unterschiede zwischen den Milch- und Dauerzähnen (M1 und M3), zwischen den Milchzähnen und M1, zwischen M1 und M3 und zwischen den nicht bzw. kaum vom Stillzeitraum beeinflussten Zähnen (Milchzähne und M3) und M1, welche stark vom Stilleffekt betroffen sein sollten, was den Eindruck aus **Abbildung 43** bestätigt. Die Signifikanz ist für die Gegenüberstellung von M1 und den beiden anderen Zahntypen (M3 und Milchzähne) bei weitem am höchsten. Die Zähne der ersten Schlachtung lassen sich hingegen statistisch nicht von denen der zweiten unterscheiden (jeweils M1 und M3). Innerhalb der Knochen unterscheiden sich die Knochenproben von Individuum 2 (welches in seiner Knochenzusammensetzung am stärksten den Stillzeitraum mitrepräsentieren sollte) signifikant von den Knochen der adulten Schweine (Ind. 3-6) und auch von den Knochen der adulten Schweine plus den Knochen von Individuum 1.

Allerdings unterscheiden sich auch die Knochen der ersten Schlachtung (Ind. 3-4) signifikant von den Knochen der zweiten Schlachtung (Ind. 5-6). Keine signifikanten Unterschiede der Mittelwerte konnten zwischen den beiden Ferkeln, oder zwischen Individuum 1 und den adulten Tieren gefunden werden. Auch die Unterschiede zwischen den einzelnen Knochentypen innerhalb der adulten vier Individuen

sind nicht signifikant. **Abbildung 44** zeigt alle gemessenen Knochenproben nach Typen, mit Beschriftung der einzelnen Proben nach Individuum. Auch hier zeigt sich, dass die einzelnen Knochentypen sich nicht stark zu unterscheiden scheinen (Gesamtspanne: 2.32 ‰), vor allem, wenn man die Proben der Ferkel (Ind. 1 und 2) nicht berücksichtigt (Gesamtspanne: 0.89 ‰). Eine Ausnahme stellt bis zu einem gewissen Grad allerdings der Knochentyp „Pars petrosa“ dar, da hier der Wert von Individuum 2 nicht, wie bei den anderen an diesem Individuum beprobten Knochentypen nach oben hin abweicht, der Wert von Individuum 1 dagegen deutlich nach unten hin abweicht.

Hochsignifikant ist jedoch jeweils der Unterschied, wenn man alle vom Stilleffekt betroffenen Proben mit den übrigen vergleicht. Ebenfalls stark ausgeprägt ist der Unterschied zwischen Knochen ohne Stilleffekt und Zähnen ohne Stilleffekt und zwischen Knochen mit Stilleffekt und Zähnen mit Stilleffekt. Das spricht dafür, dass sich Knochen und Zähne in der Ausprägung des Stilleffekts (oder anderer isotopischer Effekte) voneinander unterscheiden.

Tabelle 47 Phosphatproben nach Gewebetypen bzw. Teilgruppen: T-Test auf gleiche Mittelwerte für normalverteilte Daten, Mann-Whitney Test für nicht-normalverteilte Daten. Knochen und Zähne unterscheiden sich signifikant voneinander. Erste Molaren unterscheiden sich von Milchzähnen und dritten Molaren (jeweils einzeln und zusammen) signifikant. Milchzähne und M3 unterscheiden sich nicht signifikant. Die Knochen von Individuum 2 weichen signifikant von den übrigen Knochen ab. Ebenso unterscheiden sich die Knochen der ersten und zweiten Schlachtung. Probenotypen mit Stilleffekt lassen sich statistisch von solchen ohne unterscheiden, aber auch Knochen und Zähne unterscheiden sich (jeweils beide mit oder beide ohne Stilleffekt-Anteil). Die einzelnen Knochentypen der adulten Schweine unterscheiden sich nicht signifikant. Signifikante Unterschiede sind rot markiert.

Mann-Whitney	
Knochen / Zähne	$p = 8.3 \cdot 10^{-5}$
T-Test	
Milchzähne / Molare (M1 und M3)	$p = 0.048$
Milchzähne / M1	$p = 4.2 \cdot 10^{-5}$
Milchzähne / M3	$p = 0.782$
M1 / M3	$p = 0.0003$
Milchzähne und M3 / M1	$p = 3.5 \cdot 10^{-7}$
Zähne 1. Schlachtung / Zähne 2. Schlachtung	$p = 0.657$
Knochen Ferkel / Knochen Schweine	$p = 0.167$
Knochen Ferkel 1 / Knochen Schweine	$p = 0.405$
Knochen Ferkel 2 / Knochen Schweine	$p = 0.003$
Knochen Ferkel 1 / Knochen Ferkel 2	$p = 0.188$
Knochen 1. Schlachtung / Knochen 2. Schlachtung	$p = 0.030$
Femur (Schweine) / Mandibel (Schweine)	$p = 0.391$
Pars petrosa (Schweine) / Femur (Schweine)	$p = 0.930$
Mandibel (Schweine) / Pars petrosa (Schweine)	$p = 0.264$
Mittelfuß/Phalanges (Schweine) / Mandibel (Schweine)	$p = 0.683$
Mittelfuß/Phalanges (Schweine) / Femur (Schweine)	$p = 0.630$
Mittelfuß/Phalanges (Schweine) / Pars petrosa (Schweine)	$p = 0.631$
Alles mit Stilleffekt / Alles ohne Stilleffekt	$p = 1.0 \cdot 10^{-7}$
Knochen Ferkel 2 / Knochen ohne Stilleffekt (Ferkel 1, Schweine)	$p = 0.003$
Knochen ohne Stilleffekt (Ind. 1, 3, 4, 5, 6) / Zähne ohne Stilleffekt (Milchzahn, M3)	$p = 1.4 \cdot 10^{-5}$
Knochen mit Stilleffekt (Ind. 2) / Zähne mit Stilleffekt (M1)	$p = 0.010$

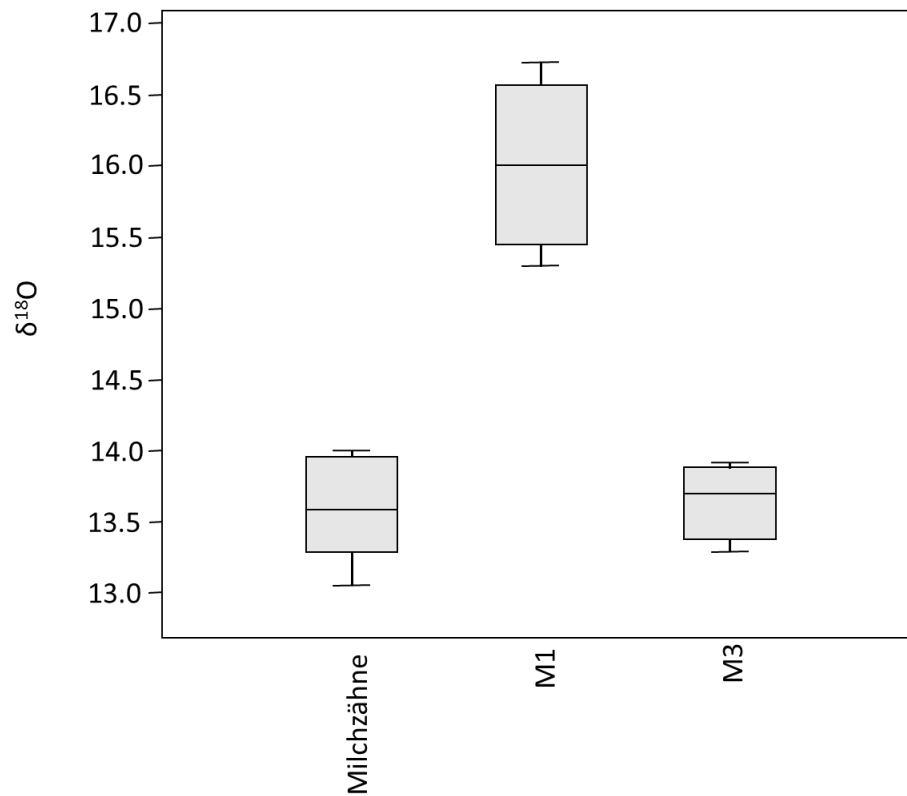


Abbildung 43 Boxplot der einzelnen Zahntypen: Milchzähne (von Individuum 1 und 2), M1 und M3 (jeweils Dauermolaren von Individuum 3-6). Die ersten Molaren weichen von den beiden anderen Zahntypen eindeutig nach oben ab.

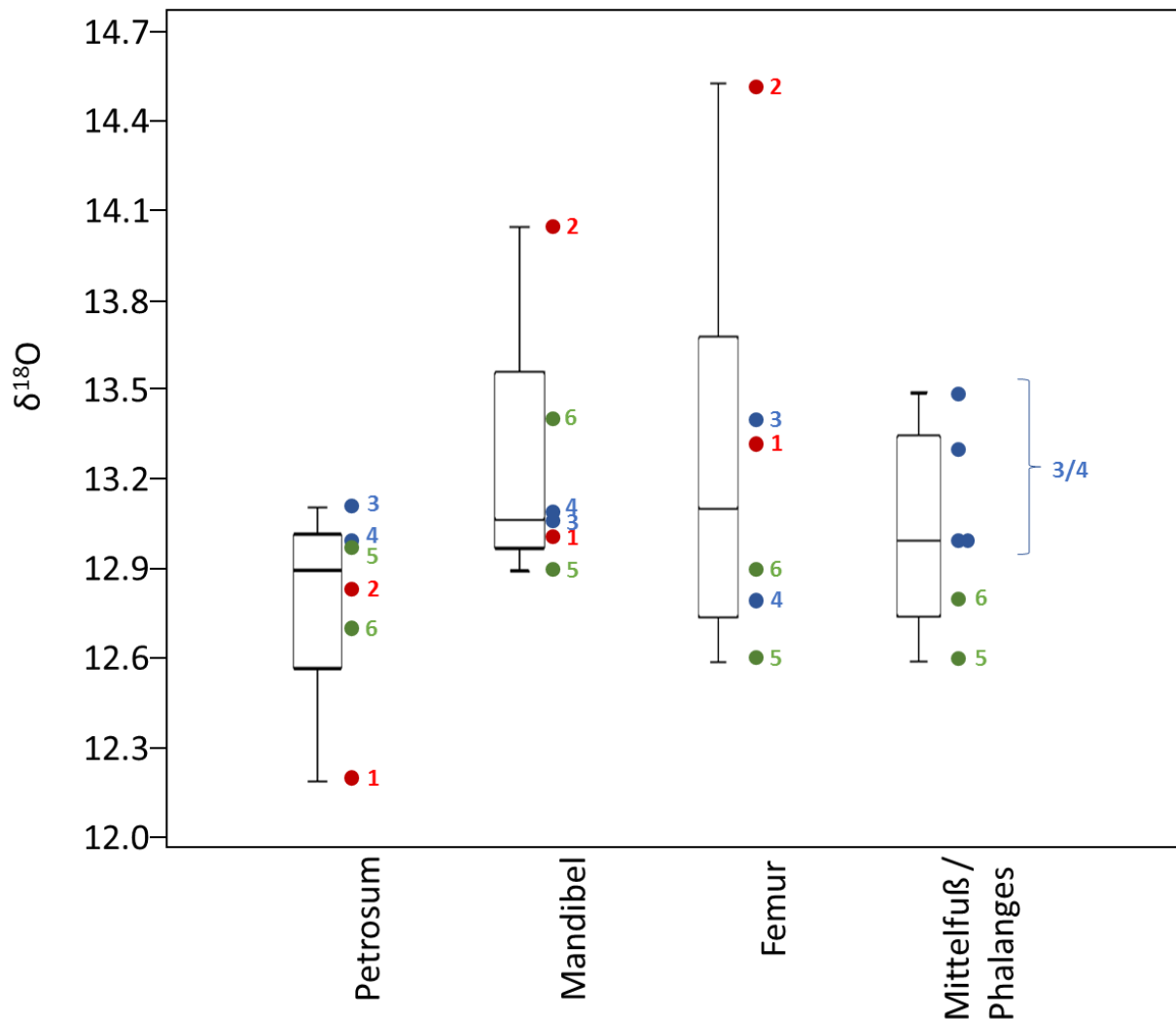


Abbildung 44 Boxplot und Jitterplot der Knochenproben. Zu jedem Knochentyp wurden die Einzelmesswerte mit Beschriftung des jeweiligen Individuums eingetragen. Wie zu erkennen ist, weicht Individuum 2 bei Mandibel und Femur nach oben hin ab, nicht jedoch bei Pars petrosa. Individuum 1 weicht dafür bei der Pars petrosa nach unten hin ab. Fußknochen wurden nur bei den adulten Individuen beprobt, die der ersten Schlachtung konnten keinen konkreten Individuum zugeordnet werden (jeweils 3 oder 4).

4. Standards

Die $\delta^{18}\text{O}$ -Ergebnisse der laborintern mitgeführten Standards NBS NIST 1400 (Knochenmehl) und NBS 120c (Phosphatgestein) finden sich in **Tabelle 68** im Anhang. NBS NIST 1400 streute insgesamt über eine Spanne von 0.18 ‰, mit einem Mittelwert von 16.74 ‰ und einer Standardabweichung von 0.1 ‰. NBS 120c streute über einen Wertebereich von 0.08 ‰, mit einem Mittelwert von 22.8 ‰ und einer Standardabweichung von 0.03 ‰. Die Messungen wurden in den Laboratorien der externen Partnerinstitutionen zusätzlich von diesen qualitativ überprüft (siehe Methodenteil).

C. Modelle

Die Ergebnisse der Futter-, Trinkwasser- und Körperwassermessungen wurden für die Modellierung der lokal zu erwartenden Wertebereiche von Körperbestandteilen, wie Körperwasser ($\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$), Borsten ($\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$) und Knochen- bzw. Zahnschmelzphosphat ($\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$) verwendet und in die entsprechenden Gleichungen eingesetzt. Dafür wurde bei manchen Modellen der jeweilige Mittelwert (\pm Standardabweichung) verwendet und zum anderen die Mindest- und Maximalwerte der jeweiligen Probestypen (nähere Erläuterungen auch in der Vorstellung der Ergebnisse der jeweiligen Modellrechnungen).

Für den Wert des Gesamtwasserinputs $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O})$ wurde ein gewichtetes Mittel aus $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$ gebildet, basierend auf Literaturangaben zum Verhältnis von Wasserinput zu Futterinput (Trockenmasse) bei Schweinen und den Wasseranteilen der jeweiligen Futterproben (Weber 2012). Laut Literaturangaben nimmt ein Schwein pro Kilogramm Trockenmasse ca. drei bis fünf Kilogramm Wasser auf. Im Mittel wurde also mit vier Kilogramm Wasser pro Kilogramm Futter-Trockenmasse gerechnet, für Minimum und Maximum wurden jeweils drei bzw. fünf Kilogramm eingesetzt. Die in die Modelle eingesetzten Werte für $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$ errechneten sich als gewichtete Mittelwerte der einzelnen Futterbestandteile, basierend auf der Zusammensetzung des Futters der adulten Testindividuen. Für die Berechnung der Mittelwerte wurde hier jeweils der Mittelwert aus der entsprechenden Futterkategorie gebildet und aus diesen Mittelwerten wiederum der gewichtete Mittelwert des Gesamtfutters (unter Berücksichtigung des Anteils des jeweiligen Futtertyps am Gesamtfutter).

Um die mögliche zu erwartende Bandbreite der lokalen Verhältnisse abzubilden wurde der Gesamtfutterwert zudem außerdem noch als gewichteter Mittelwert aller niedrigsten bzw. höchsten Werte der jeweiligen Futterkategorie (z.B. Getreide, Gras etc.) berechnet. Um die mit den gemessenen Proben theoretisch mögliche Bandbreite der Schweinegewebe bzw. des Körperwassers zu bestimmen, wurde teilweise auch noch der absolute Maximal- und Minimalwert der jeweiligen Proben eingesetzt. Dies bedeutet in den entsprechenden Modellen allerdings, dass das entsprechende Individuum sich beispielsweise ausschließlich von Molke oder Getreide ernährt haben müsste, was in der Praxis mit großer Sicherheit auszuschließen ist. Da die publizierten Modelle keine Wachstums- oder Stilleffekte berücksichtigen, wurden die Modellrechnungen nur für adulte Tiere (mit den entsprechenden physiologischen und Ernährungsparametern) durchgeführt.

1. Körperwasser

Das Körperwasser wurde anhand zweier Ansätze modelliert. Der erste Ansatz ist die lineare Regression nach Longinelli (1984):

$$\delta^{18}\text{O}(\text{KW}) = 0.88 * \delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}}) + 2.1$$

Dabei handelt es sich um eine simple lineare Gleichung, bei der die einzige Einflussgröße das meteorische (Trink-)Wasser ($\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$) darstellt, mit einer artspezifischen Steigung und Achsenverschiebung. In **Abbildung 45** sind die Ergebnisse der $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Messungen nach Alterskategorie (Ferkel = Ind. 1-2, 1. Schlachtung = Ind. 3-4, 2. Schlachtung = Ind. 5-6) abgebildet, sowie die Ergebnisse für die Modellierung nach Longinelli (1984) für Hausschweine. Zusätzlich angegeben sind die Ergebnisse für die angepasste Regressionsgleichung nach Bryant & Froelich (1995), welche

lediglich eine korrigierte Version der Gleichung von Longinelli mit veränderter Steigung und Achsenverschiebung darstellt:

$$\delta^{18}\text{O}(\text{KW}) = 0.83 * \delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}}) + 3.49$$

Angegeben sind jeweils die Berechnungen von $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ basierend auf dem Mittelwert von $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$, dem Mittelwert \pm Standardabweichung und für das Minimum und das Maximum der gemessenen Trinkwasserwerte. Wie zu erkennen ist, unterscheiden sich die beiden Versionen des Modells deutlich voneinander, tatsächlich überschneiden sich die berechneten Wertebereiche kaum. Sowohl die Gleichung von Longinelli (1984), als auch die von Bryant & Froelich (1995) führt zu $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Wertespanssen, die sich mit den tatsächlich gemessenen Werten des Körperwassers adulter Individuen überschneiden, allerdings fallen bei beiden jeweils in etwa die Hälfte der Werte heraus. Es hat den Anschein, dass jeweils eine der beiden Versionen der Gleichung besser zur ersten bzw. zweiten Schlachtung passt. Da die beiden Gleichungen sich jedoch lediglich anhand der mathematischen Korrekturen durch Bryant & Froelich (1995) unterscheiden, kann hier ausgeschlossen werden, dass dies an bestimmten physiologischen Parametern liegt, denen die Gleichungen zugrunde liegen. Die Werte der Ferkel stellen bei beiden Versionen des Modells Ausreißer dar: bei Longinelli beide infantilen Individuen, bei Bryant & Froelich zumindest Individuum 1. Aber auch ohne die (vom Stilleffekt betroffenen) Werte der Ferkel, reicht keine der beiden Gleichungen aus, die Körperwasserwerte aller adulten Individuen aus den beiden Schlachtungen zu erklären. Während die Gleichung von Longinelli (1984) besser zu den Werten der ersten Schlachtung zu passen scheint, passen die Modellgrenzen von Bryant & Froelich (1995)scheinbar besser zu den Messwerten der zweiten Schlachtung. Keine der beiden kann mit dem Trinkwasser alleine jedoch die gesamte beobachtete Variation von $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ adulter Individuen erklären.

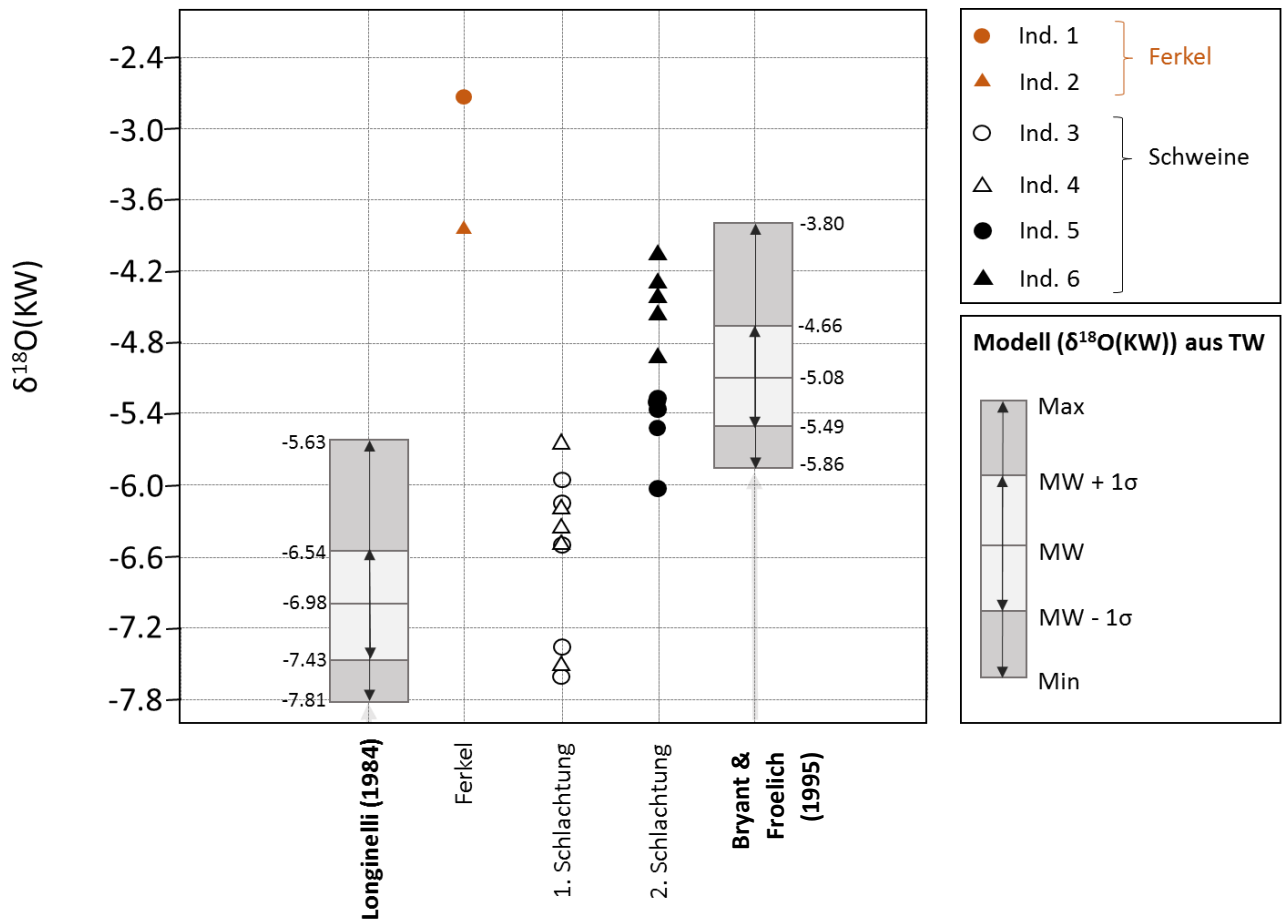


Abbildung 45 Vergleich der gemessenen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Werte mit den Vorhersagen der artspezifischen linearen Regression nach Longinelli (1984) bzw. der korrigierten Gleichung nach Bryant & Froelich (1995), basierend auf der Umrechnung von $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ in $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$. Mittelwert (MW) \pm Standardabweichung (σ) und Minimum (Min) bzw. Maximum (Max). Die vom Stilleffekt betroffenen Ferkelproben stellen eindeutige Ausreißer dar. Keine der getesteten Versionen der Regressionsgleichung kann die Gesamtheit aller gemessenen Werte erklären. Grundsätzlich liegen beide jedoch innerhalb des beobachteten Bereiches von $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$.

Der zweite getestete Ansatz zur Modellierung von $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ besteht aus komplexeren, nicht artspezifischen Massebilanz-Modellen, die neben $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ auch noch weitere Einflussgrößen berücksichtigen, wie $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$, $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$, $\delta^{18}\text{O}(\text{O}_2)$, sowie deren Flussraten und Fraktionierungsfaktoren, die Nahrungszusammensetzung und die verschiedenen Output-Größen. Die dazugehörigen Ergebnisse sind in **Abbildung 46** im Vergleich mit den tatsächlich gemessenen Werten für $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ dargestellt. Anstatt lediglich $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ zur Modellierung zu verwenden, besteht der Gesamtwasserinput in diesen Modellen aus einer Mischung aus $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$, basierend auf der Nahrungszusammensetzung der Testindividuen. Wie oben beschrieben wurde hierfür eine Variation von drei bis fünf Kilogramm Wasser pro Kilogramm Futter-Trockenmasse angenommen und berücksichtigt. $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$ wurde einerseits als gewichtete Mischung der einzelnen Futterproben typen errechnet, basierend auf der tatsächlichen Zusammensetzung der Nahrung der (adulten) Schweine (in **Abbildung 46** bezeichnet als „Minimum bzw. Maximum gewichteter MW für $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$ “). Andererseits wurden die theoretischen Absolutgrenzen des jeweiligen Modells errechnet, wobei Minimum und Maximum jeweils errechnet wurden, indem die extremsten insgesamt gemessenen Werte für $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$ eingesetzt wurden. Diese theoretischen Grenzen setzen dann voraus, dass ein entsprechendes Individuum ausschließlich Futter eines einzigen Typs gefressen haben müsste (in **Abbildung 46** bezeichnet als „Absoluter Minimal- bzw. Maximalwert für $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$ “).

In **Abbildung 46** sind die Ergebnisse der Modellrechnung nach Bryant & Froelich (1995) (A) und nach Gretebeck et al. (1997) (B) aufgeführt. Das Bryant-Modell berechnet $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ basierend auf der Körpermasse.

$$\delta^{18}\text{O}(\text{KW}) = \frac{\text{TWF} - 0.5\text{RqH}}{\text{TWF} + \text{RqH}} \delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}) + \frac{\text{H}(1.5\text{Rq} - 1)}{\text{TWF} + \text{RqH}} \delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O}) + \frac{17.2\text{H} + 16.2\text{EWL} - 38.8\text{RqH}}{\text{TWF} + \text{RqH}}$$

Diese war für die geschlachteten Individuen bekannt und das Modell wurde für 90 kg bis 105 kg schwere Tiere angewandt (was dem Minimum und Maximum der geschlachteten adulten Tiere entspricht). Für die Modellgrenzen wurden Minimal- bzw. Maximalwerte aus diesem Körpermassespektrum verwendet. Die Unterschiede in der Körpermasse machten sich allerdings erst in der zweiten Nachkommastelle der errechneten $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Werte bemerkbar.

Das Gretebeck-Modell ist in drei verschiedenen Versionen abgebildet. Diese unterscheiden sich in den verwendeten Parametern für bestimmte Fraktionierungsfaktoren (α_2 , β_1 und β_2).

$$^{18/16}\text{O}(\text{KW}) = \frac{F_1 \delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}) + F_3 \delta^{18/16}\text{O}(\text{Futter-O}) + \alpha_2 F_2 \delta^{18/16}\text{O}(\text{O}_2)}{F_6 + \beta_1 F_7 + \beta_2 F_5}$$

Version B1 verwendet die in Gretebeck et al. (1997) zitierten Werte für die Fraktionierungsfaktoren, Version B2 geht stattdessen von den in Bryant & Froelich (1995) angegebenen Fraktionierungsfaktoren aus und Version B3 verwendet wiederum leicht abweichende Literaturwerte aus Podlesak et al. (2008). Das zugrundeliegende Modell und die Werte für die jeweiligen Input- und Output-Flussraten sind aber in allen drei Versionen gleich, sodass sich durch die verschiedenen Literaturwerte nur die Höhe der Grenzen, nicht aber die Breite der Wertespanne verändert. Angegeben sind sowohl für das Bryant-, als auch für die drei Versionen des Gretebeck-Modells jeweils ein Minimum und ein Maximum, in dem die jeweils niedrigsten bzw. höchsten Werte für $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ verwendet wurden, sowie der gewichtete Mittelwert für den jeweils niedrigsten bzw. höchsten Wert aus jeder Futterkategorie, gewichtet nach dem Anteil der Futtertypen im Gesamtfutter. Zusätzlich sind die absoluten Minimal- und Maximalwerte angegeben, die sie ergeben, wenn man jeweils vom absolut höchsten bzw. niedrigsten Messwert für $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$ ausgeht (s.o.). Ein Mittelwert wird in dieser Art von Modellen deshalb nicht angegeben, weil zu viele verschiedene Parameter das Modell beeinflussen und variieren (Körpermasse, Verhältnis von Wasser zu Futter-Trockenmasse, $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$, $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$, $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$ usw.), sodass es nicht möglich ist einen plausiblen „Gesamtmittelwert“ zu bestimmen.

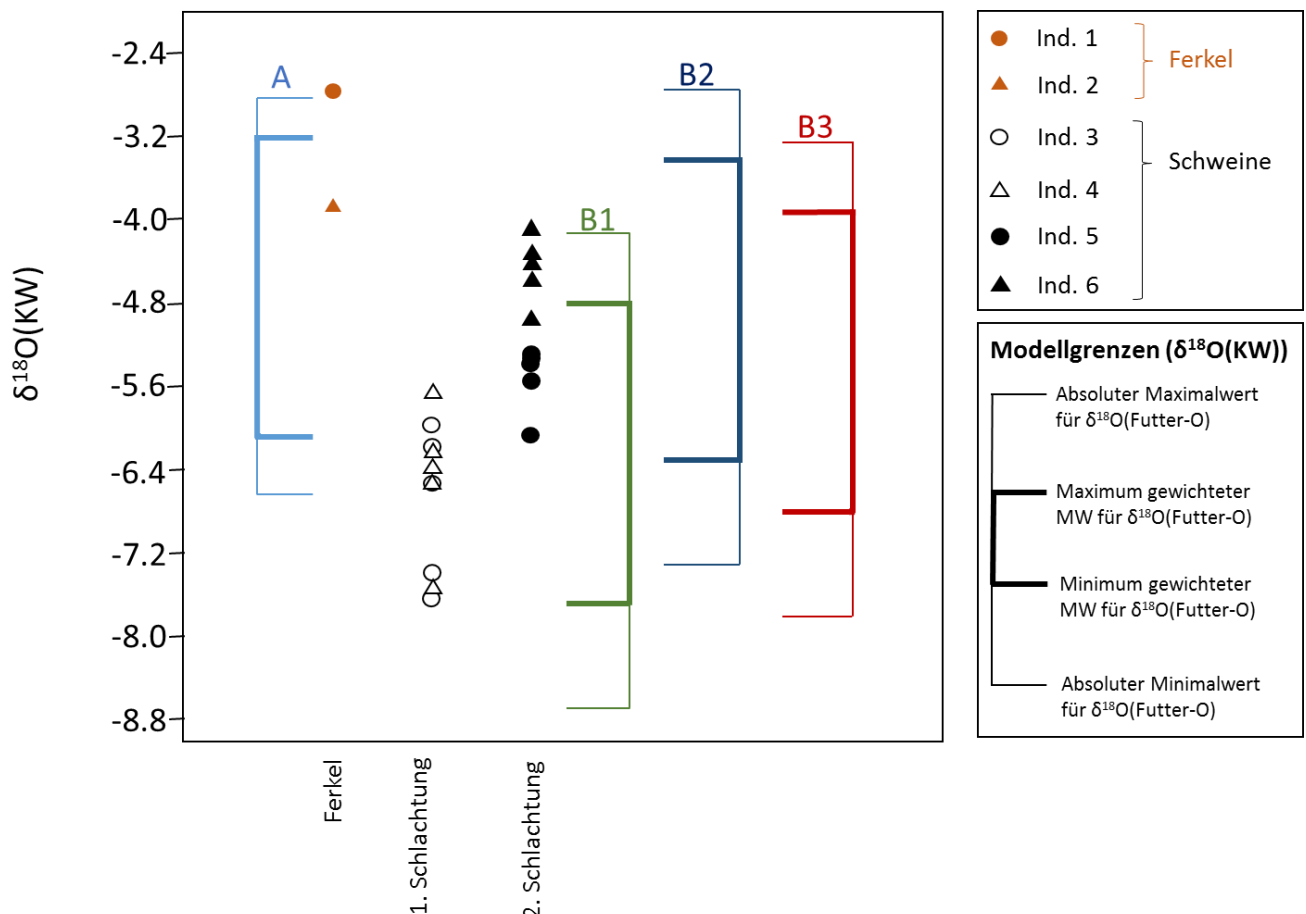


Abbildung 46 Vergleich der gemessenen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Werte mit den Vorhersagen der Massebilanzmodelle nach Bryant & Froelich (1995) (A) und Gretebeck et al. (1997) (B). B1 = Gretebeck-Modell mit dort zitierten Fraktionierungsfaktoren, B2 = Gretebeck-Modell mit Fraktionierungsfaktoren aus Bryant & Froelich (1995), B3 = Gretebeck-Modell mit Fraktionierungsfaktoren aus Podlesak et al. (2008). Angabe von Maximum und Minimum für gewichtete Mischung der Futterproben-Typen und für die absoluten Extremwerte von $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$. Keines der Modelle erfasst die gesamte Wertespanne gemessener Proben, vor allem nicht, wenn nur das jeweilige Maximum und Minimum der Futtermischung eingesetzt wird. Alle Modellversionen überschneiden sich jedoch mit dem Wertebereich der gemessenen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Ergebnisse. Der vom Stilleffekt beeinflusste $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Wert von Individuum 1 stellt auch hier einen Ausreißer dar, der von Individuum 2 ist hingegen in den meisten Modellversionen enthalten (zumindest innerhalb der Absolutgrenzen).

Beim Vergleich der Modellergebnisse mit den Messwerten fällt zunächst auf, dass die Variation der Werte für die Fraktionierungsfaktoren zwischen den drei Versionen des Gretebeck-Modells einen erheblichen Einfluss für die Position der Grenzwerte hat. Obwohl die Unterschiede zwischen den einzelnen Literaturangaben vermeintlich gering erscheinen (siehe **Tabelle 48**), haben sie doch einen merklichen Einfluss auf das Ergebnis der Modellrechnung (wohingegen zum Beispiel die Veränderung der Körpermasse im Bryant-Modell um 15 kg nahezu keinen merklichen Einfluss hat). Abgesehen davon zeigt sich, dass die Bandbreite der Modellgrenzen sich durch das Berücksichtigen weiterer Faktoren deutlich erweitert, sodass nun ein größerer Anteil der $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Messwerte innerhalb der Modellgrenzen liegt. Dies ist sowohl für die konservativen Grenzen (gewichteter MW für $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$) der Fall, als auch für die noch weiter gefassten Grenzen (absoluter Minimal- bzw. Maximalwert für $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$). Dennoch schafft es nach wie vor keine Modellversion, das Spektrum aller gemessenen Körperwasserproben adulter Tiere mit seinen konservativ gewählten Grenzen abzudecken. Werden die absoluten Extremwerte für das Futter hinzugezogen, so schafft es eine Modellversion alle Proben der adulten vier Testindividuen abzudecken: Das Gretebeck-Modell mit den Fraktionierungsfaktoren nach Podlesak et al. (2008) (Version B3). Die vom Stilleffekt betroffenen Ferkelproben werden

teilweise von den Modellen erfasst, obwohl weder Stilleffekt, noch im Wachstum befindliche Individuen in den Modellen Berücksichtigung finden. Das Bryant-Modell setzt demnach relativ hoch an, verglichen mit den Messwerten und erfasst nicht alle Individuen der ersten Schlachtung. Die genauen Werte für die jeweiligen Modellgrenzen und die dazugehörigen Fraktionierungsfaktoren sind in **Tabelle 48** angegeben.

Tabelle 48 Modellgrenzwerte der verschiedenen angewandten Massebilanz-Modellversionen. Das Bryant- und das Gretebeck-Modell (A und B) unterscheiden sich in der zugrundeliegenden Modell-Berechnung, die einzelnen Variationen des Gretebeck-Modells (B1, B2 und B3) unterscheiden sich lediglich in den Werten der Fraktionierungsfaktoren α_2 , β_1 und β_2 .

Modell	Bryant-Modell		Gretebeck-Modell	
	A	B1	B2	B3
Fraktionierungsfaktoren basierend auf:	Bryant & Froelich (1995)	Gretebeck et al. (1997)	Bryant & Froelich (1995)	Podlesak et al. (2008)
α_2	0.9937	0.992	0.9937	0.9916
β_1	0.9838	0.992	0.9838	0.985
β_2	1.0388	1.038	1.0388	1.038
Modellgrenzen (‰)				
Max (absolut)	-2.85	-4.14	-2.78	-3.28
Max (gew. MW)	-3.23	-4.81	-3.45	-3.95
Min (gew. MW)	-6.08	-7.66	-6.30	-6.78
Min (absolut)	-6.65	-8.67	-7.31	-7.78

2. Borsten

Die Modelle für die Schätzung von $\delta^{18}\text{O}$ (Haar) basieren auf der Berechnung der Sauerstoffisotopie des Darmwassers ($\delta^{18}\text{O}$ (DW)) und der daraus abgeleiteten Berechnung des Haarwertes. Die Ergebnisse der verschiedenen Ansätze sind in **Abbildung 47** im Vergleich zu den tatsächlich an subadulten und adulten Individuen gemessenen Haarwerten dargestellt. Zwei grundsätzliche Ansätze wurden für diese Schätzung getestet, die sich in der Methode zur Modellierung des Darmwassers unterscheiden. Der erste Ansatz stammt von Podlesak et al. (2008) nach Gretebeck et al. (1997) (in der Abbildung als A bezeichnet) und bezieht bei der Modellierung des Darmwassers $\delta^{18}\text{O}$ (KW), $\delta^{18}\text{O}$ (O₂) und $\delta^{18}\text{O}$ (Futter-O) mit ein. Auch hier wurden dieselben Berechnungen alternativ noch einmal mit den Fraktionierungsfaktoren nach Bryant & Froelich (1995) angestellt. Ansonsten unterscheiden sich die Versionen A1 und A1 nicht voneinander. Da in dieser Berechnung die Trockenmasse des Futters eine Rolle spielt, wurde hier erneut so verfahren, dass neben den Mittelwerten und gewichteten Minima und Maxima auch die Berechnung für den jeweils größten und kleinsten Messwert des Futters angestellt wurde. Auch hier bedeuten diese extremen Außengrenzen des Modells, dass das entsprechende Tier ausschließlich Futter desselben Typs gefressen haben müsste.

Beim zweiten Ansatz gibt es keine derartigen Extremgrenzen, da hier die Modellierung von $\delta^{18}\text{O}$ (DW) ohne Einbeziehen von $\delta^{18}\text{O}$ (Futter-O) stattfindet. Die Variablen hier sind stattdessen $\delta^{18}\text{O}$ (KW), $\delta^{18}\text{O}$ (TW) und $\delta^{18}\text{O}$ (H₂O_{Futter}). Während im Ansatz von Podlesak et al. (2008) die jeweiligen Flussraten vorgegeben werden, sind sie in diesem Modell variabel und werden als g_1 (Anteil KW) und g_2 (Anteil TW + H₂O_{Futter}) bezeichnet. Für diese existieren in der Literatur verschiedene Angaben, die aufgrund theoretischer Überlegungen postuliert wurden, oder anhand experimenteller Daten geschätzt. Je nach Version spielt also der Anteil des Körperwassers im Darmwasser im Vergleich zum über die Nahrung

aufgenommenen Wassers (TW und $\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}}$) eine unterschiedlich große Rolle. Bei Ehleringer et al. (2008) setzt sich das Darmwasser zum Beispiel zu 75 % aus Körperwasser und zu 25 % aus Trink- und Nahrungswasser zusammen (B1). Bei Bowen et al. (2009) ist der Anteil des Körperwassers mit 57 % geringer (B2). O'Grady et al. (2012) hingegen postulierten eine so hohe Sekretion von Körperwasser im Magen, dass $g_1 = 1$ und $g_2 = 0$ gesetzt wurden (B3). Als vierte Option wurde das andere Extrem gewählt: kein Einfluss von $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ auf $\delta^{18}\text{O}(\text{DW})$, was postuliert, dass das Darmwasser in seiner isotopischen Zusammensetzung ausschließlich vom Trink- und Futterwasser bestimmt wird und somit $g_1 = 0$ und $g_2 = 1$ ist (B4). Diese Variante setzt eine hohe Trinkrate im Verhältnis zur sekretierten Magen- bzw. Darmflüssigkeit voraus. Alle drei Modellvarianten aus der Literatur (B1-B3) stammen von Studien am Menschen oder nichtmenschlichen Primaten (Makaken).

Für die Darmwasser-Modellierung wurden die beobachteten Werte des Körperwassers eingesetzt, nicht die modellierten, um bereits vorliegende Ungenauigkeiten, oder Fehler bei der Körperwasserschätzung nicht auf die Schätzung von $\delta^{18}\text{O}(\text{DW})$ zu übertragen.

Bei beiden Modellen (A und B) wurde im Anschluss an die Modellierung von $\delta^{18}\text{O}(\text{DW})$ der Wert von $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ über den Fraktionierungsfaktor $\alpha_0 = 1.0164$ (zwischen DW und Haar) nach Kreuzer-Martin et al. (2003) berechnet.

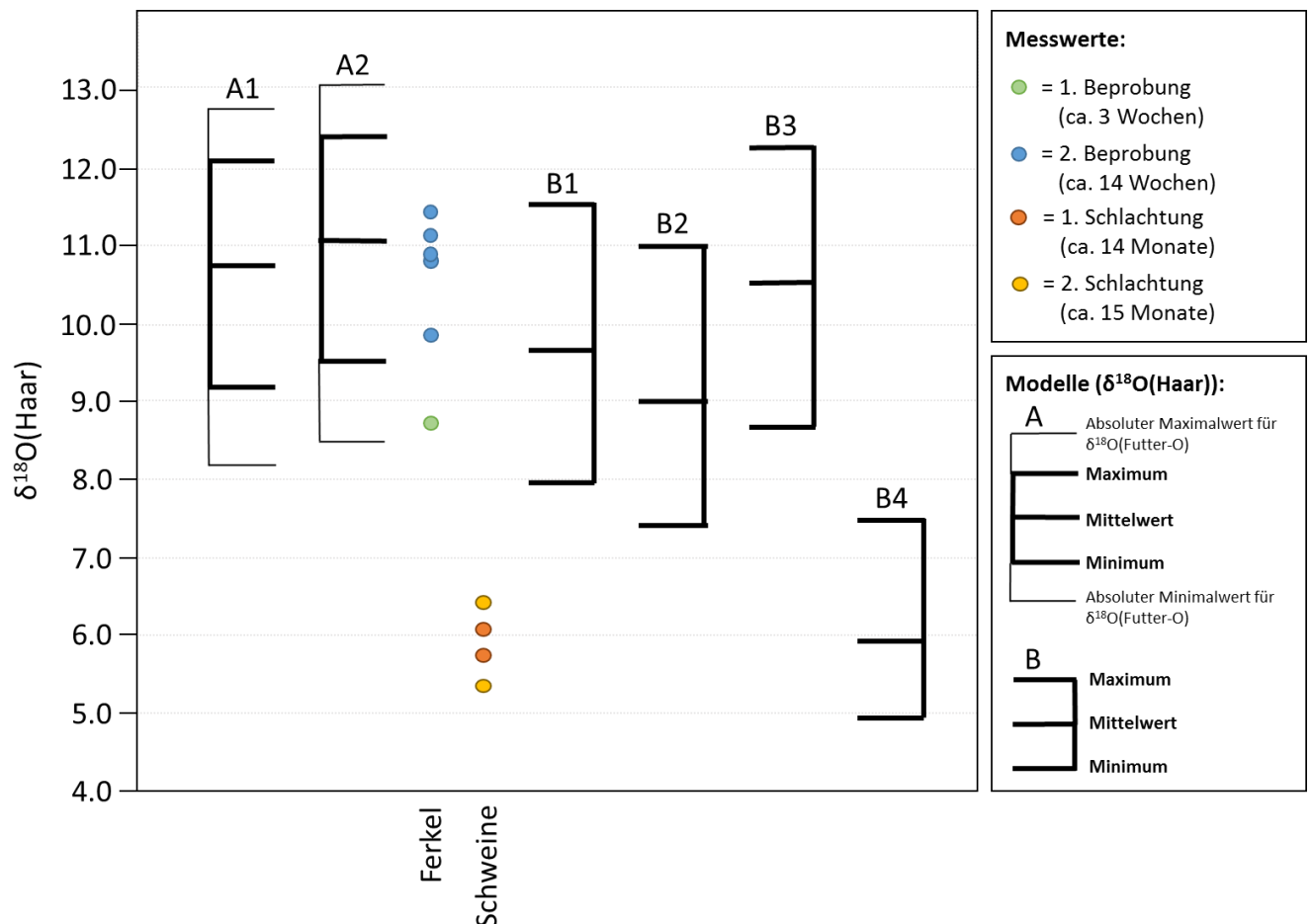


Abbildung 47 Vergleich der gemessenen $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ -Werte mit den Vorhersagen der Massebilanzmodelle nach Podlesak et al. (2008) und Gretebeck et al. (1997) (A) und Ehleringer et al. (2008) (B). A1 = Podlesak-Gretebeck-Modell mit dort zitierten Fraktionierungsfaktoren, A2 = Fraktionierungsfaktoren aus Bryant & Froelich (1995). B1 = Ehleringer-Modell mit dort zitierten Werten für g_1 und g_2 , B2 = mit Werten von g_1 und g_2 nach Bowen et al. (2009), B3 = mit Werten g_1 und g_2 nach O'Grady et al. (2012), B4 = Postulierte Werte: $g_1 = 0$ und $g_2 = 1$. Angabe von Mittelwerten, Maximum und Minimum für gewichtete Mischung der Futterproben-Typen und für die absoluten Extremwerte von $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$ beim Podlesak-Gretebeck-Modell. Keines der Modelle erfasst die Wertespanne gemessener Proben adulter Tiere, außer B4. Die übrigen Modellversionen überschneiden sich nicht einmal mit dem Wertebereich der gemessenen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Ergebnisse für die geschlachteten Schweine, dafür gibt es aber große Überschneidungen mit den Werten subadulter, vom Stilleffekt betroffener Tiere.

Wie sich in **Abbildung 47** zeigt, weist keines der getesteten Modelle aus der Literatur auch nur Überschneidungen mit den tatsächlichen $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ -Werten der adulten Tiere auf. Stattdessen fallen die Werte der subadulten Tiere zum größten Teil in die vorhergesagten Spannen. Die einzige Modellvariante, die nahezu perfekt die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der gemessenen Borstenproben von den vier adulten Individuen vorhersagt, ist diejenige welche von 0 % Körperwasser-Isotopie im Darmwasser ausgeht und unabhängig von in der Literatur postulierten Annahmen angewandt wurde. Die genauen Grenzwerte der verschiedenen Modellvariationen finden sich in **Tabelle 49**.

Tabelle 49 Modellgrenzen der getesteten Modelle zur Schätzung von $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$. Mittelwerte (MW), Minimum und Maximum und absoluten Extremwerten (nur beim Podlesak-Gretebeck-Modell).

Modell	Podlesak-Gretebeck-Modell		Ehleringer/Bowen/O'Grady-Modell			
	A1	A2	B1	B2	B3	B4
Modellgrenzen (‰)						
Max (absolut)	12.76	13.09				
Max	12.09	12.41	11.53	11.00	12.26	7.48
MW	10.76	11.09	9.64	9.00	10.53	5.91
Min	9.20	9.53	7.94	7.41	8.67	4.96
Min (absolut)	8.18	8.51				

Es wurden außerdem zwei lineare Regressionsgleichungen für die Schätzung von $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$, basierend auf $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ an den vorliegenden Daten getestet (Ehleringer et al. 2008, Bowen et al. 2009), die jedoch anhand menschlicher Daten etabliert wurden. Die Schätzungen liegen in der Tat weit über den Daten adulter Testindividuen und selbst oberhalb der meisten Ferkelproben. Nur eine Ferkelprobe liegt innerhalb der vorhergesagten Spanne. Die geschätzten Spannen beider Regressionen sind vergleichsweise gering, da sie den Wertespannen gemessener Trinkwasserproben entsprechen. Tabelle 50 fasst die Ergebnisse dieser beiden linearen Schätzungen zusammen.

Tabelle 50 Grenzen der Schätzung basierend auf den linearen Regressionsgleichungen zur Berechnung von $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ basierend auch $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ für Menschen. Die beiden Schätzungen erfassen beide nur eine einzige gemessene Borstenprobe von einem vom Stilleffekt betroffenen Ferkel. Beide Schätzungen liegen nah beieinander und decken nur einen sehr schmalen Wertebereich ab, da sie in ihrer Wertespanne direkt von der Verteilung der Trinkwasserproben abhängen.

Modell	Ehleringer et al. (2008)	Bowen et al. (2009)
Max	12.10	13.09
MW + 1 σ	11.73	12.37
MW	11.56	12.01
MW - 1 σ	11.38	11.66
Min	11.23	11.36

3. Phosphat

Für die $\delta^{18}\text{O}$ -Modellierung des Knochen- bzw. Zahnschmelz-Phosphates existieren keine eigenen Massebilanzmodelle, da ein linearer Zusammenhang zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ postuliert wird und somit die Massebilanz des Körperwassers modelliert wird, um darüber die Sauerstoffisotopie des Phosphates zu errechnen.

Es existieren allerdings zwei grundsätzliche Wege, $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ mit einfachen linearen Gleichungen zu schätzen: erstens anhand des Trinkwassers ($\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$) und zweitens anhand des Körperwassers ($\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$). Beide Möglichkeiten konnten hier anhand der vorhandenen Daten überprüft werden. Die lineare Regression für $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ anhand von $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ ist wiederum artspezifisch und die verwendete Gleichung für Hausschweine stammt, wie schon jene für die Schätzung von $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ von Longinelli (1984):

$$\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-}) = 0.86 * \delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}}) + 22.71$$

Abbildung 48 zeigt den Vergleich der gemessenen $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Daten mit den Grenzen, die sich ergeben, wenn man $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ mittels der linearen Regression anhand von $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ nach Longinelli (1984) berechnet. Eingesetzt wurden dabei wiederum der Mittelwert der Trinkwasser-Daten \pm der Standardabweichung, sowie der höchste und niedrigste gemessene $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ -Wert. Proben, die (deutlich) vom Stilleffekt betroffen sein sollten (M1 und Knochen von Individuum 2), sind in der Abbildung rötlich eingefärbt. Wie zu erkennen ist, erfasst das lineare Regressionsmodell alle Milchzähne und Dauermolaren, jedoch nur etwa die Hälfte der gemessenen Knochenproben. Nach oben hin stellt auch keine Knochenprobe von Individuum 2 einen Ausreißer dar, obwohl das aufgrund des Stilleffekts zu erwarten wäre. Stattdessen fallen einige Knochen (sowohl von den Ferkeln 1 und 2, als auch von den adulten Tieren) nach unten heraus. Vernachlässigt man die vom Stilleffekt betroffenen Proben ergibt sich also der Eindruck, dass das Regressionsmodell von Longinelli (1984) insgesamt im Vergleich zu den tatsächlichen Werten nach oben hin verschoben ist.

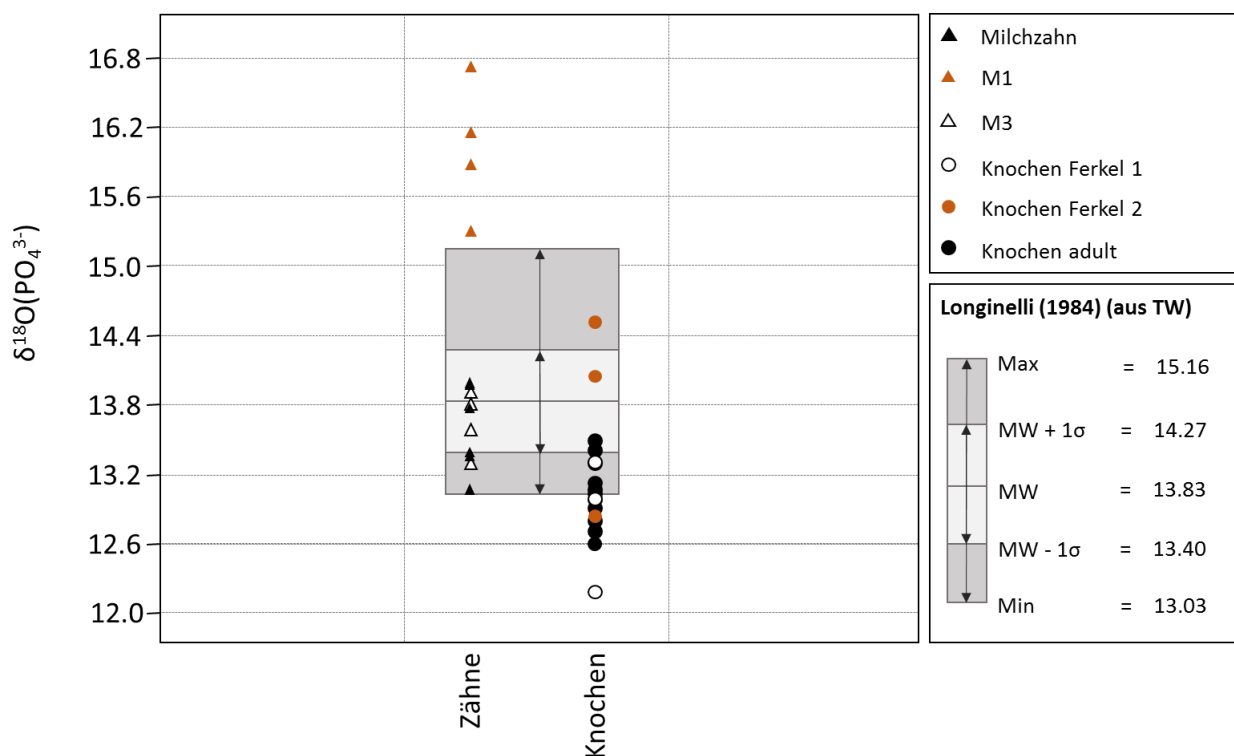


Abbildung 48 Vergleich der gemessenen $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Werte mit den Vorhersagen der artspezifischen linearen Regression nach Longinelli (1984), basierend auf der Umrechnung von $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ in $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$. Mittelwert (MW) \pm Standardabweichung (σ) und Minimum (Min) bzw. Maximum (Max). Die vom Stilleffekt betroffenen Werte der ersten Molaren (M1) stellen eindeutige Ausreißer dar, die Knochen von Individuum 2 jedoch nicht. Grundsätzlich liegt die Schätzung innerhalb des beobachteten Bereiches von $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$, jedoch scheint die, auf dem Trinkwasser basierende Schätzung insgesamt zu hoch zu liegen, sodass einige Knochenwerte nach unten hin herausfallen.

Die Beziehung zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ wird in der Literatur als nahezu konstante Verschiebung (oder Fraktionierung) interpretiert. Der entsprechende Fraktionierungsfaktor zwischen den beiden wird hier als $\alpha_{\text{PO}_4\text{-KW}}$ bezeichnet. Die gemessenen Werte für $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ wurden mit verschiedenen publizierten Werten für diese Differenz verglichen, die von Studien an verschiedenen Arten her stammen (siehe **Tabelle 30**). Das Körperwasser wurde hierfür nicht wie oben beschrieben modelliert, sondern stattdessen die tatsächlichen Messwerte für $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ verwendet. In **Abbildung 49** sind die Messergebnisse aller $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Proben im Vergleich zu den Schätzungen, basierend auf verschiedenen publizierten Werten für $\alpha_{\text{PO}_4\text{-KW}}$. Hierfür wurden jeweils der höchste und

Ergebnisse (Sauerstoff)

niedrigste gemessene Wert von $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ („Min/Max (adult)“), sowie der Mittelwert der $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Daten adulter Individuen („MW (adult)“) verwendet, um mittels $\alpha_{\text{PO}_4\text{-KW}}$ die Werte von $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ zu errechnen. Zusätzlich wurde jeweils auch noch der höchste $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Wert der Ferkel eingesetzt („Max (Ferkel)“), um auch die vom Stilleffekt betroffenen Proben potentiell miteinzubeziehen.

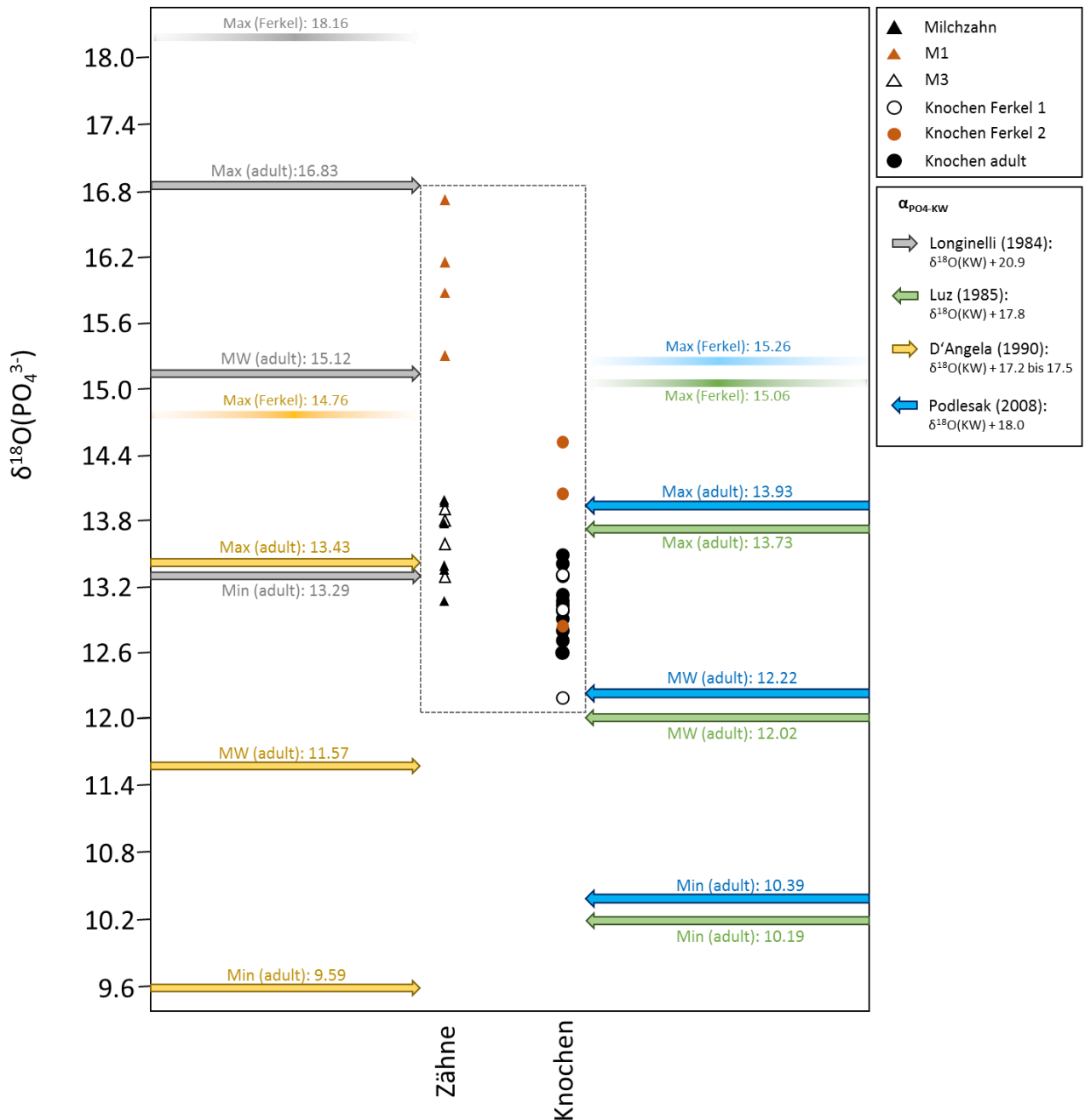


Abbildung 49 Vergleich der $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Werte mit verschiedenen Literaturwerten für $\alpha_{\text{PO}_4\text{-KW}}$. Zum Mittelwert (MW), dem höchsten (Max) und dem niedrigsten (Min) Messwert für $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ wurde jeweils der jeweilige publizierte Wert addiert, um so $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ zu errechnen. Zusätzlich wurde dasselbe für den höchsten gemessenen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Wert der Ferkel durchgeführt um auch die vom Stilleffekt betroffenen Proben vergleichen zu können. Keiner der Literaturwerte führt zu einem Ergebnis, das die gesamte Bandbreite der beobachteten Werte korrekt widerspiegelt (sowohl mit, als auch ohne Stilleffekt).

Auch hier scheint die Schätzung basierend auf dem, an Schweineknöchel ermittelten, Wert von $\alpha_{\text{PO}_4\text{-KW}}$ aus Longinelli (1984) höher anzusetzen, als die Messdaten (grau). Hier werden sogar alle vom Stilleffekt betroffenen Proben (auch M1) miteingeschlossen, selbst wenn nur das Körperwasser adulter Tiere für die Schätzung verwendet wird. Wieder fallen einige Knochen und in diesem Falle sogar

Milchzähne und dritte Molare nach unten hin aus dem Modell. Im Gegensatz dazu setzt die an Rinderknochen validierte Modellierung nach d'Angela & Longinelli (1990) deutlich zu niedrig an. Selbst mit dem Körperwasser der Ferkel werden die M1-Proben nicht erfasst und bei der Modellierung anhand des adulten Körperwassers fallen einige Milchzähne, M3 und Knochen nach oben hin als Ausreißer heraus. Die Werte von Luz & Kolodny (1985) und Podlesak et al. (2008) für $\alpha_{\text{PO}_4\text{-KW}}$ ähneln einander sehr stark, was in der Folge auch zu ähnlichen Ergebnissen bei den Modellgrenzen führt. Beide wurden am Zahnschmelz von Ratten etabliert. Trotzdem passen die Ergebnisse am besten zu den in dieser Studie erhobenen $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Daten. Die vorhergesagte Wertespanne scheint zwar ebenfalls etwas zu niedrig anzusetzen, jedoch fallen die meisten nicht vom Stilleffekt betroffenen Proben hinein, mit Ausnahme zweier Milchzähne. Dafür werden mit der Verwendung des seinerseits vom Stilleffekt betroffenen Körperwassers der Ferkel nicht alle vom Stilleffekt betroffenen Proben (erste Molare) erfasst. Mit keinem der publizierten Fraktionierungsfaktoren lässt sich also die beobachtete Verteilung der $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Daten anhand des Körperwassers vollständig erklären.

VII. Diskussion (Sauerstoff)

A. Trinkwasser

Das Trinkwasser eines Tieres wird allgemein als der wichtigste Einflussfaktor auf die Zusammensetzung stabiler Sauerstoffisotope ($\delta^{18}\text{O}$) im Körper angesehen (Longinelli 1984, Levinson et al. 1987, Bryant & Froelich 1995, Kohn 1996, Boner & Förstel 2004, O'Brien & Wooller 2007, Podlesak et al. 2008, Kirsanow & Tuross 2011). Hier lohnt sich also ein genauerer Blick auf die Verteilung der gemessenen Werte und eine Einordnung im Vergleich zu gängigen Schätzmethode und Erfahrungswerten. Wie sich im Ergebnisteil gezeigt hat, weist das Trinkwasser von allen gemessenen $\delta^{18}\text{O}$ -Proben die niedrigsten Werte auf. Dies entspricht den Erwartungen, da $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ noch durch keine biologischen Anreicherungsvorgänge betroffen ist und das von rein klimatischen bzw. abiotischen Faktoren abhängige, lokale Niederschlagswasser (bzw. Umweltwasser) am direktesten widerspiegeln sollte (Rossmann et al. 1999, O'Grady et al. 2012, Bowen 2015). Im Zuge einer ähnlichen Fütterungsstudie an Hausschweinen von Tuross et al. (2008) ergab sich dementsprechend ebenfalls, dass das Trinkwasser die niedrigsten $\delta^{18}\text{O}$ -Werte aufwies. Der in dieser Studie ermittelte Mittelwert von $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ beträgt ca. $-10.3 \pm 0.4 \text{ ‰}$ und liegt damit nur leicht oberhalb des von Boner & Förstel (2004) angegebenen Vergleichswertes von $-11.2 \pm 0.5 \text{ ‰}$ für Grundwasser im süddeutschen Raum.

Für viele Schätzungen, Umrechnungsgleichungen und Modelle körperinterner $\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnisse stellt $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ bzw. $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ die wichtigste, oder sogar einzige Einflussgröße dar (Longinelli 1984, d'Angela & Longinelli 1990, Ayliffe et al. 1992, Daux et al. 2008, Nakashita et al. 2008). Besonders bei archäologischen, aber auch ökologischen und anderen Fragestellungen, kann das Trinkwasser jedoch nicht direkt untersucht werden, weswegen oftmals auf Interpolationen des lokalen Niederschlags zurückgegriffen wird (d'Angela & Longinelli 1990, Ayliffe et al. 1992, Huertas et al. 1995, Bowen et al. 2005, Bowen 2015). Der OIPC-Wert hat sich dabei häufig als guter Schätzwert erwiesen (Daux et al. 2008, Bowen et al. 2009). Auch in dieser Arbeit wurden die gemessenen Trinkwasserwerte mit denen der Schätzung durch OIPC verglichen. Wie sich zeigte, passt das Jahresmittel hervorragend zum Mittel der gemessenen Wasserproben, sowohl jenen aus dem Quellwasser, als auch jenen aus dem Leitungswasser (Differenz $< 0.6 \text{ ‰}$). Auch Daux et al. (2008) verglichen in ihrer Studie lokal gemessene $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des Leitungswassers mit den entsprechenden OIPC-Schätzungen und kamen ebenfalls zu dem Schluss, dass beide, mit Differenzen von weniger als 0.8 ‰ sehr gut zueinander passten.

Bowen (2009) sieht den OIPC ebenfalls als guten Schätzwert für das von lokal lebenden Menschen aufgenommene Wasser. Worin das in diesem Experiment untersuchte Wasser jedoch eindeutig von den Vorhersagen durch OIPC abweicht, ist das völlige Fehlen einer erkennbaren saisonalen (oder sonstigen) Variation. Während die Interpolation für das Niederschlagswasser Schwankungen von über 9 ‰ über das Jahr hinweg postuliert, schwanken die gemessenen Trinkwasserwerte um weniger als 2.5 ‰ und das ohne erkennbare Abhängigkeit von der Jahreszeit, oder sonstigen schwankenden Faktoren, wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit oder Luftdruck. Starke saisonale Schwankungen von $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ an einzelnen Standpunkten in Süddeutschland oder Österreich wurden bereits von Dansgaard (1964) nachgewiesen (Stuttgart: 12 ‰ (-4 bis -16 ‰), Wien: 15‰ (-1 bis -16‰). Im Vergleich dazu blieb die Sauerstoffisotopenzusammensetzung des Trinkwassers dieser Studie über das Jahr hinweg nahezu stabil. Diese Konstanz wird noch deutlicher, wenn zwei der Proben, die möglicherweise von Evaporationsprozessen betroffen waren, nicht hinzugerechnet werden.

Diese beiden Werte wurden trotzdem in entsprechenden Modellrechnungen für die gesamte Variation von $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ miteinbezogen, da die evaporativen Veränderungen durchaus vor Ort stattgefunden haben könnten, weil die Haupttränke, aus der sie stammten, sich im Außenbereich befand und somit stärkeren äußeren Einflüssen ausgesetzt war. Gleichzeitig wurde diese Tränke von den adulten Tieren am häufigsten genutzt. Sämtliche gemessenen Wasserproben (Quell- und Leitungswasser) haben ihren Ursprung nicht direkt im lokalen Niederschlag. Die Erklärung für das Fehlen von jeglicher Saisonalität in den Messwerten kann damit erklärt werden, dass das Trinkwasser aus einer lokalen Grundwasserquelle stammte, welches zwar meist ein gutes Mittel der jährlichen Niederschlagswerte abbildet, jedoch dadurch keine entsprechenden kurzfristigen Schwankungen aufweist (Rozanski 1985, Holbach et al. 1994, Darling et al. 2003, Darling et al. 2006, Van Geldern et al. 2014).

Laut Pederzani & Britton (2018) liegen die Schwankungen der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte innerhalb unterirdischer Gewässer meist unter 2 ‰. Nimmt man die beiden, von (nach dem Austreten aus dem Boden erfolgter) Evaporation betroffenen Proben (P-Wa-17a und P-Wa-29a) heraus, liegt die beobachtete Wertespanne der gemessenen Wasserproben bei 1.42 ‰, also deutlich darunter. Selbst mit den beiden Proben wird der Richtwert von 2 ‰ mit 2.48 ‰ nur leicht überschritten. Auch für das Leitungswasser, welches sich nicht von den anderen Wasserproben unterscheiden ließ, scheint dies zuzutreffen, was dafür spricht, dass auch dieses aus lokalem Grundwasser oder dem Wasser eines großen lokalen Wasserkörpers stammt. Folglich lässt sich schließen, dass die Schätzung durch OIPC für das Trinkwasser auch in dieser Studie eine sehr präzise Methode zu sein scheint, wenn auch in diesem konkreten Fall keine jahreszeitliche Variabilität gegeben ist. Schlussfolgernd kann $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$, über die Dauer des gesamten Fütterungsexperimentes, weitestgehend als konstant betrachtet werden. Dies kann insofern gewissermaßen als Glücksfall angesehen werden, dass das Trinkwasser als Haupteinflussgröße für die $\delta^{18}\text{O}$ -Zusammensetzung der meisten Körpergewebe gilt.

Die Sauerstoffisotopie des Körperwassers wird, laut Berechnungen von Kohn (1996), zu 70-75 % vom lokalen Oberflächenwasser bestimmt. Bowen et al. (2009) ermittelten, dass ca. 77 % der in ihren Haarproben beobachteten isotopischen Variation zwischen den untersuchten Gruppen durch Unterschiede im Umweltwasser zu erklären sei. Auch der Futterinput wird oft vom lokalen Umweltwasser bestimmt. Spezielle Studien haben in der Vergangenheit bereits näher untersucht, wieviel Einfluss alleine das Trinkwasser auf die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Körper hat. In einer Fütterungsstudie an Nagern kamen Podlesak et al. (2008) zu dem Schluss, dass 56 % des Sauerstoffes im Körperwasser alleine aus dem Trinkwasser der Tiere stammte. Zu ähnlichen Werten kamen auch weitere Studien, die allerdings zum Teil auch den Input an Futterwasser ($\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$) hinzurechneten (Pederzani & Britton 2018). Laut Ehleringer et al. (2008) liegt dieser Wert für den Sauerstoff in menschlichem Haar bei immerhin 35 %, nach O'Brien & Wooller (2007) bei ca. 27 %.

Laut Bryant & Froelich (1995) und Kohn (1996) ist der Einfluss des Trinkwassers für große Arten am höchsten, die eine hohe Trinkrate im Verhältnis zur Metabolismusrate aufweisen. In den meisten publizierten Studien wurde daher der Sauerstoffisotopen-Input durch das Futter konstant gehalten (oder als konstant betrachtet), während $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ variierte (Chesson et al. 2008, Daux et al. 2008, Ehleringer et al. 2008, Podlesak et al. 2008, Kirsanow & Tuross 2011, Wolf et al. 2011, Green et al. 2018). Im Gegensatz dazu ist es in dieser Studie gewissermaßen umgekehrt: Das Trinkwasser blieb isotopisch gesehen annähernd konstant (oder wies zumindest nur vergleichsweise niedrige Schwankungen auf), wodurch alle in den untersuchten Individuen auftretenden Schwankungen, die über die Variation von $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ hinausgehen, auf die übrigen Faktoren (z.B. saisonale oder anderweitige Schwankungen des Futters, inter- und intraindividuelle Unterschiede in Bezug auf Mengenverhältnisse von Futterkomponenten und Trinkwasser, Aktivität, etc.) zurückzuführen sein müssen. Die (nahezu) konstante Trinkwasserisotopie erlaubt also den potentiellen Einfluss aller dieser anderen Einflussgrößen abzuschätzen, der in manchen einfachen Modellen zur Berechnung von Körpergeweveisotopen (z.B. einfache lineare Regressionen) überhaupt nicht berücksichtigt wird (Luz et al. 1984, Bryant & Froelich 1995, Kohn 1996, Bowen et al. 2009). Dazu gehört beispielsweise der Input an Nahrung (Futter-O und $\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}}$). Dieser kann, obwohl dies hier für das Trinkwasser nicht zutrifft, sehr wohl von saisonalen Effekten betroffen sein, da das Wasser der Futterpflanzen nicht aus Grund- sondern Niederschlagswasser besteht und zudem auch innerpflanzliche Vorgänge (z.B. Wachstum und Transpiration) die die isotopische Anreicherung beeinflussen saisonal schwanken können (Dongmann et al. 1974, Förstel 1978, Förstel 1978, Green et al. 2018).

Ebenso können saisonal bedingte Unterschiede erst auf der Ebene des Individuums selbst zustande kommen: Aktivität, transpirationsbedingter Wasserverlust im Zuge der Hitzeregulation, die Menge an aufgenommenem Trinkwasser und die Zusammensetzung der Nahrung etc. können alle von der Jahreszeit beeinflusst sein (Luz et al. 1984, Huertas et al. 1995, Boner & Förstel 2004). Darüber hinaus gibt es natürlich auch potentielle nicht-saisonal bedingte Faktoren, wie Wachstum bzw. Körpergröße und Stilleffekt, Umstellung der Fütterung und individuelle Unterschiede zwischen den Schweinen (Aktivität, Gesundheit, etc.), die zur Erweiterung der Verteilungsspannen der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte führen können (Bryant & Froelich 1995, Lin et al. 2003, Daux et al. 2008, Kirsanow & Tuross 2011, Green et al. 2018). Da die Variabilität der gemessenen Schweineproben höher ist als die des Trinkwassers, müssen alle diese weiteren Faktoren eine signifikante Rolle für das Zustandekommen der Isotopenverhältnisse im Körper der Testindividuen spielen und somit bei deren Schätzung oder Modellierung berücksichtigt werden. Auch Boner & Förstel (2004) kamen zu dem Schluss, dass für aussagekräftige Schätzungen in Bezug auf die Sauerstoffisotopen der Körpergewebe von Nutztieren neben dem Wert von $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ auch Zusatzinformationen, wie den Zeitpunkt der Schlachtung, die Herkunft und Zusammensetzung des Futters, die Art der Fütterung etc. benötigt werden.

B. Futter

Neben dem im Trinkwasser enthaltenen Sauerstoff stellt auch der Sauerstoffanteil des Futters ($\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}}$ und Futter-O) einen signifikanten Input für die Körperzusammensetzung eines Landsäugetieres dar und kann somit zur Variabilität der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte verschiedener Körperbestandteile beitragen. Damit muss Sauerstoff, der über die Nahrung aufgenommen wird, als wichtige Variable verstanden werden (Bryant & Froelich 1995, Kohn 1996, Boner & Förstel 2004). So stammen laut Bryant & Froelich (1995) zum Beispiel ca. 20 % des Sauerstoffes im Gewebswasser aus der Oxidation organischer Materie. Der Einfluss von atmosphärischem Sauerstoff ist zwar ebenfalls groß, jedoch ist $\delta^{18}\text{O}(\text{O}_2)$ im Gegensatz zu $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$ weitestgehend konstant (Dole et al. 1954, Kroopnick & Craig 1972,

Horibe et al. 1973). Laut dem an Nagern entwickelten Modell von Podlesak et al. (2008) setzt sich der $\delta^{18}\text{O}$ -Wert des Körperwassers zu 56 % aus Trinkwasser, zu 30 % aus atmosphärischem Sauerstoff und zu immerhin 15 % aus dem im Futter enthaltenen Sauerstoff zusammen. Dieser zusätzliche Einfluss des Futters kann die Interpretation von $\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnissen in organischen Geweben erschweren (Fraser et al. 2006, O'Brien & Wooller 2007). Generell gilt zwar, dass die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von Wasser und Nahrung am selben Ort parallel variieren und somit zusammenpassen sollten, jedoch spielen dabei verschiedene Anreicherungs- und Fraktionierungsfaktoren eine Rolle und außerdem müssen das Trinkwasser der Tiere und das Wasser der Futterpflanzen nicht zwangsläufig aus denselben Quellen stammen (Hobson 1999, Bowen et al. 2005, O'Brien & Wooller 2007). Letztgenanntes ist sehr wahrscheinlich auch in dieser Studie der Fall: Während es sich beim Trinkwasser um isotopisch sehr einheitliches Grundwasser handelt, erhielten die Futterpflanzen ihr Wasser aus dem lokalen Niederschlagswasser und dem Boden. Im Mittel entspricht dieses (wie oben erläutert) zwar wahrscheinlich dem Grund- bzw. Trinkwasser, jedoch kann es hier zu deutlich höheren (saisonalen) Schwankungen kommen, die sich dann auf $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$ übertragen und schließlich auch im Körpergewebe bemerkbar machen können (Biondi et al. 2013).

Eine mögliche saisonale bzw. futterwechselbedingte Variation zeigte sich auch im Gewebswasser der Testindividuen (zwischen erster und zweiter Schlachtung). Laut Boner & Förstel (2004) gibt es grundsätzlich zwei Hauptursachen für saisonale Schwankungen der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Futter, nämlich einerseits die Schwankungen im Niederschlags- und damit den Pflanzen zur Verfügung stehenden Wassers (Dansgaard 1964) und andererseits die stärkere Anreicherung an ^{18}O aufgrund von Fraktionierungsereignissen bei der Transpiration an den Blattstomata der Futterpflanzen in der wärmeren Wachstumsphase (Dongmann et al. 1974, Förstel 1978, Burk & Stuiver 1981). Zusätzlich zu den Schwankungen von $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ reagiert das Blattwasser also sensibel auf klimatische Veränderungen in der Wachstumssaison, wodurch das Niederschlagswasser noch einmal fraktioniert wird (Gonfiantini et al. 1965, Dongmann et al. 1972, Zundel et al. 1978). Wie stark diese Anreicherung in den Blättern (und auch anderen Pflanzenteilen) ausfällt, ist abhängig von der jeweiligen Pflanzenphysiologie und -anatomie, der Temperatur und Luftfeuchtigkeit und weiteren Faktoren, welche die Evapotranspiration beeinflussen können (Epstein et al. 1977, Leaney et al. 1985, Sternberg 1989, Yakir 1992, Holbach et al. 1994, Leyden et al. 2006).

Pflanzen- bzw. Futterwasser ist generell gegenüber dem Umweltwasser isotopisch signifikant an ^{18}O angereichert (Houerou et al. 1999, Schmidt et al. 2001, Thiem et al. 2004, Daux et al. 2008), wie auch in dieser Studie. Dieser Effekt ist jedoch einerseits von klimatischen und artspezifischen Faktoren abhängig und andererseits auch innerhalb ein und derselben Pflanze nicht einheitlich. Während das Wasser in Wurzeln und Stängeln isotopisch noch am ehesten dem Niederschlagswasser entspricht, steigen die $\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnisse in Richtung Blätter immer mehr an (Merlivat 1978, Dunbar & Wilson 1983, Sponheimer & Lee-Thorp 1999, Barbour et al. 2004, Luz et al. 2009, Cernusak et al. 2016). Das Blattwasser ist dementsprechend am stärksten angereichert, weil die Blätter den photosynthetisch und transpirativ aktivsten Bestandteil der Pflanze darstellen (Gonfiantini et al. 1965, Dongmann et al. 1974, Epstein et al. 1977, Sternberg 1989, Yakir 1992). Dasselbe gilt auch für die organischen Bestandteile der Pflanze, die dem Pflanzenwasser gegenüber wiederum abermals fraktioniert sind. So weist Blatt-Zellulose zum Beispiel höhere $\delta^{18}\text{O}$ -Werte auf, als Wurzel-Zellulose (Epstein et al. 1977, Sternberg 1989, Yakir 1992, Tredget et al. 1993).

Zusätzlich spielt dabei auch die Wurzeltiefe der jeweiligen Pflanze eine Rolle, da flache Wurzeln Wasser aus oberen Erdschichten aufnehmen, welches bereits vor der Aufnahme zusätzlich evaporativ fraktioniert sein kann, was bei Wasser aus tieferen Schichten nicht mehr möglich ist (Brunel et al. 1991, Busch et al. 1992, Dodd et al. 1998, Adams & Grierson 2001, Tang & Feng 2001, Cook & O'Grady 2006, Barbour 2007). Obwohl die Transpiration von Wasser an den Blattstomata den größten Einfluss auf die

Fraktionierung innerhalb der Pflanze hat, spielen auch noch andere Faktoren eine Rolle, wie zum Beispiel die Freisetzung von Sauerstoff aus Wasser im Zuge der Photosynthese oder der umgekehrten Reaktion bei der Zellatmung (Dole et al. 1954, Lane & Dole 1956). Das Verhältnis zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$ ist also hochkomplex und kann zu einer großen und schwer vorhersagbaren Variation im Futter führen (Luz et al. 1984). Auch die Pflanzenart und somit die Ernährungsweise spielen eine Rolle. So wird in Gras laut einigen Studien ^{18}O stärker angereichert, als in anderen Blattpflanzen (Gat & Bowser 1991, Wang & Yakir 1995, Helliker & Ehleringer 2000, Gan et al. 2003, Ogée et al. 2007).

In diesem Experiment weist das Gras von allen Futterttypen eher die niedrigsten $\delta^{18}\text{O}$ -Werte (sowohl $\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}}$, als auch Futter-O) auf. Allerdings ist die Stichprobengröße, besonders der $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$ -Proben gering und somit nicht zwangsläufig repräsentativ. Außerdem ist das Herkunftsgebiet des Schweinefutters relativ groß, wodurch auch kleinräumige klimatische Unterschiede eine Rolle gespielt haben könnten, sodass das für die Graspflanzen verfügbare Niederschlagswasser (oder die transpirationsrelevanten Klimafaktoren) dort allgemein zu niedrigeren standortspezifischen Werten geführt haben könnte. Vor allem aber ist das Gras die einzige Blattpflanze, welche an die Schweine verfüttert wurde. Getreide und Kartoffeln sind als Samen und Knollen Speichergewebe, in denen andere (heterotrophe) Stoffwechselprozesse eine zusätzliche Rolle spielen können.

Laut Dongmann et al. (1974) beträgt die minimale Anreicherung von $\delta^{18}\text{O}(\text{Blattwasser})$ gegenüber dem Bodenwasser +2.5 ‰ und die maximale Anreicherung 21 ‰. Bryant & Froelich (1995) gibt dagegen Werte von + 10 bis + 25 ‰ Anreicherung an (basierend auf: Dongmann et al. (1974), Förstel (1978), Farris & Strain (1978)). Die in dieser Studie maximal ermittelbare Differenz zwischen dem niedrigsten $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ und dem höchsten $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$ -Wert beträgt 5.97 ‰ und die Differenz der Mittelwerte beträgt 3.31 ‰. Beide fallen somit in die von Dongmann et al. (1974) angegebene Spanne, sind jedoch niedriger als von Bryant & Froelich (1995) zitiert. Jedoch ist der Vergleich von Trinkwasser und Futterwasser nicht optimal, da das Trinkwasser wie gesagt nicht saisonal schwankte, wie vermutlich das pflanzenverfügbare Niederschlagswasser. Geht man von den $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ -Werten des OIPC aus, so beträgt die maximale Differenz 8.91 ‰, was noch immer nicht die minimale Anreicherung nach Bryant & Froelich (1995) erreicht. Die minimale Differenz zwischen Messwerten und OIPC-Monatswerten wiederum ist negativ, das heißt es gibt OIPC-Werte für das Niederschlagswasser in bestimmten Monaten, die sogar höher liegen als die niedrigsten $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$ -Werte. Von diesen Vergleichen ausgehend, kann man annehmen, dass sich die isotopische Anreicherung im Futter gegenüber dem Umweltwasser bestätigt hat, jedoch eher in unteren Bereich des Spektrums liegt, vorausgesetzt die Proben und Schätzwerte sind repräsentativ. Das Futter- bzw. Pflanzenwasser scheint hier also weniger stark angereichert zu sein, als in manchen Quellen angegeben. Dabei ist allerdings zu beachten, dass es sich nicht bei allen Futterpflanzen um Blätter handelt und somit eine geringere Anreicherung in Körnern, Früchten, Knollen etc. ohnehin zu erwarten ist.

Noch komplexer ist das Zustandekommen der $\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnisse in den organischen Molekülen von (Futter-)Pflanzen. Die Sauerstoffatome in Pflanzenmolekülen stammen ursprünglich aus drei verschiedenen anorganischen Ausgangsstoffen: CO_2 , H_2O und O_2 . Diese stammen aus unterschiedlichen Quellen und können deshalb sehr unterschiedliche $\delta^{18}\text{O}$ -Werte aufweisen. Hinzu kommt, dass es innerhalb der Pflanze zu verschiedensten Inkorporations- und Fraktionierungsreaktionen kommt, welche verschiedene Isotopeneffekte zur Folge haben können. Diese sind zwar teilweise im globalen Mittel bekannt, die genauen Reaktionen die für sie verantwortlich sind dagegen, sind nur grob erforscht (Roden et al. 2000, Schmidt et al. 2001, Chesson et al. 2010). So ist beispielsweise mittlerweile sehr gut bekannt und ausgiebig erforscht, dass der $\delta^{18}\text{O}$ -Wert von Zellulose gegenüber dem entsprechenden Pflanzenwasser um ungefähr 27 ± 4 ‰ erhöht ist, schwankend mit verschiedenen Faktoren, wie zum Beispiel dem jeweiligen Pflanzenteil (Blatt,

Stängel,...), der Art der Photosynthese (C3 oder C4-Pflanzen) oder der Pflanzenart bzw. dem Stoffwechselstatus (Epstein et al. 1977, Burk & Stuiver 1981, Edwards et al. 1985, Sternberg 1989, Yakir et al. 1990, Yakir 1992, Schmidt et al. 2001). Der Effekt, der hierfür hauptsächlich verantwortlich gemacht wird, ist eine Gleichgewichtsfractionierung zwischen Carbonylgruppe und Wasser. Jedoch tragen mehrere Effekte zum $\delta^{18}\text{O}$ -Wert von Zellulose bei, die sich dann in den meisten Pflanzen(-teilen) zu einem globalen Mittel von $+ 27 \pm 4 \text{ ‰}$ mitteln, obwohl große speziesspezifische Unterschiede existieren (DeNiro & Epstein 1979, Sternberg 1989, Schmidt et al. 2001). So kann es teilweise auch zu Abweichungen von diesem Wert kommen. Auch die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte anderer organischer Pflanzenmoleküle, wie organische Säuren, Kohlenhydrate, Alkohole und Ester zeigen mit dem Pflanzenwasser korrelierte Werte, die meist für das jeweilige Molekül spezifisch sind (z.B. Acylgruppe ca. $+ 19 \text{ ‰}$ gegenüber dem Blattwasser), abhängig vom Ursprung der Ausgangsstoffe und deren Biosynthesewege (Schmidt et al. 2001).

Der Sauerstoff in der Trockenmasse der Futterpflanzen stellt eine bunte Mischung all dieser verschiedenen Stoffe und Isotopenverhältnisse dar. Hinzu kommt die Tatsache, dass die vom Konsumenten aufgenommene Nahrung nicht zu einhundert Prozent verdaut wird, sodass unklar ist, welche Isotopie tatsächlich in den Organismus gelangt. Die Verdaulichkeit hängt einerseits von intrinsischen Faktoren der Nahrung ab und andererseits von extrinsischen Faktoren des Verdauungssystems. Die genauen Fraktionierungsvorgänge zwischen $\delta^{18}\text{O}$ (Futter-O) und den tierischen Körperbestandteilen sind also unbekannt (Bryant & Froelich 1995). Aufgrund dieser hohen Komplexität organischer Pflanzenmoleküle und deren Sauerstoffisotopenverhältnisse und den Ungewissheiten bei der Aufnahme in den Organismus, ist man hier auf statistische Schätzwerte und Vereinfachungen angewiesen. Laut Bowen et al. (2009) ist $\delta^{18}\text{O}$ (Futter-O) gegenüber dem aufgenommenen Umweltwasser um ca. 35.4 ‰ erhöht, basierend auf Vergleichen zwischen Messungen an regionalen pflanzlichen Produkten und den zugehörigen OIPC-Werten. Die in dieser Arbeit erhobenen $\delta^{18}\text{O}$ (Futter-O)-Daten sind im Mittel gegenüber dem Trinkwasser um 34.92 ‰ und gegenüber dem OIPC-Jahresmittel um 34.18 ‰ erhöht, was hervorragend zu dieser Angabe passt.

Allerdings ist die Variabilität der Messergebnisse um diesen Mittelwert sehr hoch: Die minimale Differenz (zwischen höchstem $\delta^{18}\text{O}$ (TW)- und niedrigstem $\delta^{18}\text{O}$ (Futter-O)-Wert) beträgt 23.81 ‰ und die maximale (zwischen niedrigstem $\delta^{18}\text{O}$ (TW)- und höchstem $\delta^{18}\text{O}$ (Futter-O)-Wert) 43.08 ‰ und auch beim entsprechenden Vergleich mit den monatlichen OIPC-Schätzungen, bzw. deren Jahresmittel erhöht sich die Bandbreite durch die Variation der $\delta^{18}\text{O}$ (Futter-O)-Ergebnisse entsprechend. Als mögliche Gründe hierfür sind Unterschiede im Wasser-Input der verschiedenen Futterpflanzen, physiologische Unterschiede zwischen den Pflanzen, unterschiedliche Transpirationsraten im Verlauf des Jahres und an verschiedenen Standorten, die oben genannte Komplexität beim Zustandekommen des globalen $\delta^{18}\text{O}$ (Futter-O)-Wertes, sowie der relativ große Radius, aus dem das Futter stammte, zu nennen. Von Bryant & Froelich (1995) wird angegeben, dass Zellulose und andere Komponenten von Pflanzen (wie Zucker) in der Regel $\delta^{18}\text{O}$ -Werte zwischen ca. $+ 10 \text{ ‰}$ und $+ 25 \text{ ‰}$ aufweisen.

Die hier gemessenen $\delta^{18}\text{O}$ (Futter-O)-Verhältnisse pflanzlicher Futterquellen liegen zwischen 19.55 ‰ und 31.82 ‰ , im Mittel bei 25.16 ‰ , also tendenziell über diesem Richtwert, wobei vor ausschließlich das Hochenergiefutter, also Getreide und Kartoffeln die 25 ‰ übersteigen, was möglicherweise auf spezielle Stoffwechselwege bei der Synthese von Speichergeweben zurückzuführen sein könnte. Die Differenz zwischen $\delta^{18}\text{O}$ (Futter-O) und $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$ liegt in dieser Studie für Gras bei 30.01 ‰ und für Kartoffeln bei 32.05 ‰ , was gut zu der Angabe von Roden et al. (2000) passt, die für die Differenz zwischen Pflanzenwasser und organischen Bestandteilen einen groben Richtwert von ca. 30 ‰ angeben. Auch zu der oben erläuterten globalen mittleren Korrelation zwischen Pflanzenwasser und Zellulose ($27 \pm 4 \text{ ‰}$) passen diese Werte recht gut, obwohl Zellulose mit Sicherheit nicht den größten Anteil am Futter hat um vor allem nicht der von den Schweinen am meisten aufgenommene Stoff ist bzw. kaum verdaut wird.

Die große Komplexität beim Zustandekommen der $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$ - und $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$ -Verhältnisse und deren große Spannweite verdeutlicht, dass die Ernährungsweise, insbesondere ein Futterwechsel oder eine individuelle Nahrungspräferenz einen starken Einfluss auf die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Konsumenten haben kann, was sich auch in verschiedenen Studien bestätigt hat (Kornexl et al. 1997, Sponheimer & Lee-Thorp 1999, Bahar et al. 2005, Perini et al. 2009, Biondi et al. 2013). Zwar wurden zu wenige Futterproben gemessen, um eindeutig saisonale Unterschiede erkennen zu können, jedoch fand im Leben der untersuchten Testindividuen ein Futterwechsel zu mehr Niedrigenergiefutter (Gras und Silage) statt. Da Hoch- und Niedrigenergiefutter sich in ihren $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$ -Werten signifikant unterscheiden, ist dieser Wechsel der Futterzusammensetzung ein zu berücksichtigender Faktor beim Zustandekommen der Variabilität der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte innerhalb der Schweineproben. Brot und Molke stellen eine sehr diverse Stichprobe dar, die jedoch in gleichbleibend sehr geringen Mengen verzehrt wurde und deshalb vermutlich wenig zu inter- und intraindividuellen Unterschieden beigetragen hat. Die hier gemessenen Werte sind gut vergleichbar mit einer ähnlichen Fütterungsstudie, die von Tuross et al. (2008) durchgeführt wurde. Auch hier wurden Schweine, deren Futter und Trinkwasser untersucht und auch hier lagen alle Schweinewerte zwischen denen des Trinkwassers und denen der Futter-Trockenmasse.

Im Allgemeinen verhalten sich die erhobenen Messwerte am Futter also entsprechend den Erwartungen: Das Futterwasser ist gegenüber dem Trink- bzw. Umweltwasser leicht angereichert und es besteht ein eindeutiger Offset zwischen Futterwasser- (bzw. auch Trinkwasser-) und Futter-Trockenmasse-Isotopie, der sich (wenn auch hoch variabel) ungefähr im zu erwartenden Bereich befindet. Besonders bei den Futterwasserproben, aber auch bei der Trockenmasse ist allerdings die geringe Stichprobengröße zu berücksichtigen, welche die Aussagekraft der Ergebnisse schmälert. Das Hinzuziehen von zusätzlichen, nicht in relevanten Mengen konsumierten Futtertypen (Apfel, Stroh,...) erhöht das Spektrum möglicher Isotopeneinflüsse und erhöht die Wahrscheinlichkeit, das gesamte, über die Nahrung verfügbare $\delta^{18}\text{O}$ -Spektrum abzubilden. Dies wiederum bedeutet, dass Modelle, die mit diesem Input gespeist werden, vermutlich nicht deswegen eine ausreichend große Spannweite der Schweineproben voraussagen, weil bestimmte Futterquellen nicht berücksichtigt wurden, sondern aus anderen Gründen nicht weit genug greifen bzw. ohne weitere Modifikationen nicht universell einsetzbar sind. Die gemessenen Daten des Futters können also als valide Grundlage für die Modellrechnungen angesehen werden.

C. Schweineproben

Für die Interpretation der $\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnisse in den verschiedenen Körperbestandteilen der Testindividuen ist es wichtig, die jeweiligen Turnoverraten zu berücksichtigen und damit die Zeit, die vom jeweiligen Körpergewebe repräsentiert wird. Gewebetypen mit höheren Turnoverraten bilden die Sauerstoffisotopenverhältnisse der jüngeren Vergangenheit ab, während solche mit niedrigeren Turnoverraten sich isotopisch langsamer umwandeln und entsprechend verzögert auf Veränderungen reagieren (Bowen et al. 2005, Tütken 2010, Lehn & Graw 2012, Biondi et al. 2013). So bildet jeder hier untersuchte Probenotyp eine Mischung derjenigen Inputs, Outputs und innerkörperlicher Reaktionen ab, die das entsprechende Gewebe über seine Bildungszeit hinweg beeinflusst haben. In **Abbildung 50** ist zusammengefasst, welche Zeiträume von den jeweiligen untersuchten Schweineproben pro Individuum ungefähr abgebildet werden. Angegeben ist ein Zeitstrahl, welcher vom Beginn der Trächtigkeit bis hin zur Beprobung bzw. Schlachtung verläuft. Eingetragen sind auch wichtige Ereignisse und Zeiträume, welche sauerstoffisotopische Auswirkungen auf die Individuen haben, wie Geburt und Stillphase und der Futterwechsel hin zu einem reduzierten Kraftfutteranteil.

Gewebe, die kontinuierlichem Turnover über die Lebenszeit hinweg unterliegen, sind mit einem Farbverlauf dargestellt, welcher andeutet, dass der Anteil des Einflusses der bestimmenden Faktoren umso geringer wird, je weiter die entsprechenden Faktoren zeitlich vom Beprobungszeitpunkt entfernt liegen. Gewebetypen, die biologisch inert und somit in ihrer Bildungszeit eindeutig abgegrenzt sind, werden als gleichbleibende Balken über den Bildungszeitraum hinweg dargestellt. Dies trifft in diesem Experiment nur auf die verschiedenen untersuchten Zahntypen zu, da die Borsten zwar an sich ebenfalls nach der Bildung inert sind, jedoch in ihrer Gesamtheit kontinuierlich nachgebildet werden (Dean 1987, Bowen et al. 2005, Hillson 2005, Tütken 2010). Bei den Zahnschmelzproben ist zu beachten, dass es nicht zwangsläufig gegeben ist, dass die Mineralisation über den gesamten Bildungszeitraum hinweg gleichbleibend verläuft. Dies wurde hier nur vereinfachend angenommen. Korrekterweise verläuft die Zahnschmelzbildung nicht kontinuierlich, sondern besonders in der letzten Phase unterliegt der Zahn einer erhöhten Mineralisationsrate (Smith 1998, Balasse 2002, Blumenthal et al. 2014, Green et al. 2017, Pederzani & Britton 2018). Da über die genauen Details hierzu jedoch nicht ausreichend Informationen vorliegen, wird die Zahnschmelzbildung als gleichbleibender Mittelwert des Mineralisationszeitraumes interpretiert. **Abbildung 50** gilt generell auch für den Vergleich mit den zuvor diskutierten Strontiumergebnissen.

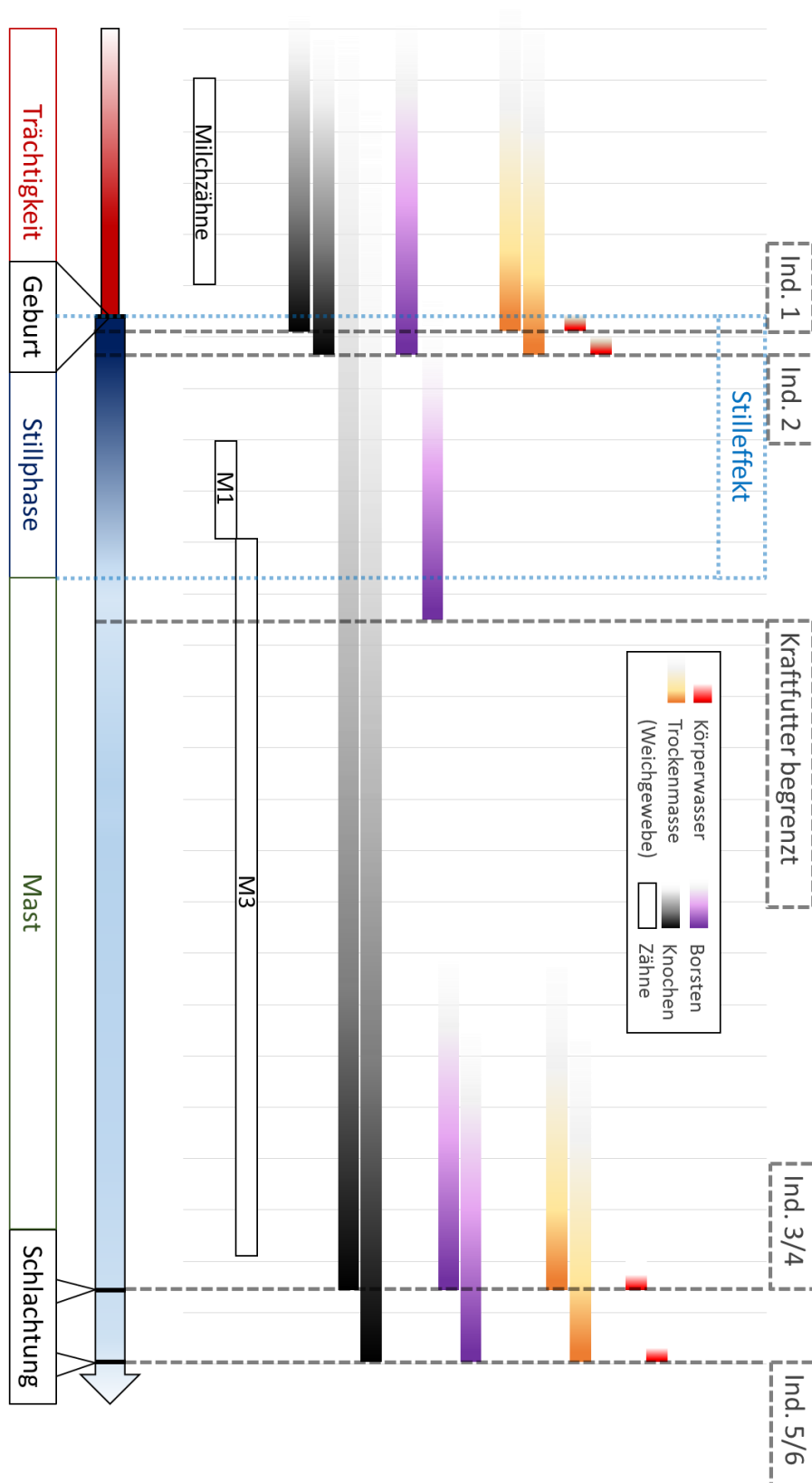


Abbildung 50 Repräsentationszeiten der beprobten Gewebe: Die unterschiedlichen genommenen Proben der untersuchten Tiere zum jeweiligen Beprobungszeitpunkt und der Zeitspanne, über das das jeweilige Gewebe ungefähr isotopisch integriert. Auf dem Zeitstrahl sind wichtige Lebensabschnitte gekennzeichnet, die Einfluss auf die Isotopie der Proben gehabt haben können. Ebenfalls eingezeichnet ist der Zeitraum, in dem der Stilleffekt einen Einfluss haben sollte. Alle Gewebe, die in ihren Repräsentationszeiten eine Überschneidung mit einem bestimmten Zeitraum zeigen, sollten zumindest teilweise von den Einflüssen in diesem Zeitraum mitbestimmt sein.

1. Weichgewebe

a) Körperwasser

Wie in **Abbildung 50** zu erkennen ist, weist von allen untersuchten Schweineproben das Körper- bzw. Gewebswasser (rot) die höchste Turnoverrate auf und bildet somit auch den kürzesten Zeitraum vor der Beprobung ab (Green et al. 2018).

Die Turnover-Zeit des Körper- bzw. Gewebswassers liegt bei nur wenigen Tagen und hängt im Einzelnen unter anderem von der Körpergröße und metabolischen Aktivität ab (Longinelli & Peretti 1983, Luz et al. 1984, Schoeller 1990, Bryant & Froelich 1995, Chen & Auerswald 2018). Beim Menschen wurde eine Halbwertszeit der Sauerstoffisotopenverhältnisse des Wassers im Urin (welcher isotopisch dem Körperwasser entsprechen sollte) von ca. 5 Tagen errechnet (O'Brien & Wooller 2007). Für Ratten wurde eine Halbwertszeit des Körperwassers von ca. 1.5 Tagen festgestellt, bzw. dass ein isotopisches Gleichgewicht mit den neuen Isotopenverhältnissen nach etwa einer Woche vollständig erreicht ist (Longinelli & Padalino 1980), in einer anderen Studie Werte zwischen 3 und 4 Tagen (Podlesak et al. 2008). Nagetiere sind jedoch sehr viel kleiner und metabolisch aktiver als Schweine und deshalb möglicherweise keine gute Referenz. Bei Schafen, die zumindest größtmäßig in einem ähnlichen Bereich liegen wie Schweine wurden Halbwertszeiten für $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ von ca. 2-3 Tagen ermittelt (Green et al. 2018). Für die hier untersuchten Schweine (welche auch unter ähnlichen Bedingungen gehalten wurden) sollte sich der Körperwasser-Turnover zumindest in einer ähnlichen Größenordnung befinden und eine Halbwertszeit von einer Woche nicht deutlich übersteigen.

Das heißt, dass im Körperwasser die Isotopen-Einflüsse der letzten Tage vor der Beprobung relativ eindeutig und ohne größeren Anteil von weiter zurückliegenden Einflüssen widerspiegelt werden. Da das Körperwasser zudem eine sehr hohe Durchmischungsrate aufweist (Podlesak et al. 2008, Green et al. 2018), wundert es nicht, dass die verschiedenen Weichgewebetypen sich bezüglich $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ nicht unterscheiden lassen, wohl aber die verschiedenen Beprobungszeiträume. Das Körperwasser ist zu einem bestimmten Zeitpunkt im ganzen Körper eines Individuums also relativ konsistent, verändert sich aber schnell über die Zeit hinweg und ist anfällig für kurzfristige Schwankungen der Gegebenheiten. Selbst zwischen nah beieinanderliegenden Zeitpunkten (z.B. ein Monat zwischen erster und zweiter Schlachtung) lassen sich signifikante Unterschiede feststellen, die kurzfristige (evtl. sogar tagesaktuelle) Isotopeneinflüsse im Gewebswasser sichtbar machen, welche in langlebigeren Proben typen herausgemittelt werden. Dasselbe scheint für die beiden Ferkel der Fall zu sein, deren $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Daten ebenfalls stark voneinander abweichen, wenn auch statistisch nicht überprüfbar, aufgrund der geringen Stichprobengröße. Für einen bestimmten (kurzfristigen Zeitraum) scheint wiederum die Wertespanne der $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Verhältnisse relativ ähnlich zu sein (erste Schlachtung: 1.96 ‰, zweite Schlachtung: 1.66 ‰), was ebenfalls für die hohe Sensibilität des Körperwassers auf kurzfristige Veränderungen spricht.

Da der Futterwechsel zeitlich zu weit in der Vergangenheit liegt, um noch isotopische Unterschiede im Körperwasser der Schweine aus der ersten und zweiten Schlachtung zu erklären und das Trinkwasser (wie zuvor beschrieben) weitestgehend konstant war, müssen andere Faktoren für die Unterschiede zwischen der ersten und der zweiten Schlachtung verantwortlich sein. Dies können beispielsweise äußere Einflüsse, wie die Wetterverhältnisse sein, die zu unterschiedlichen Transpirations- oder Trinkraten geführt haben, oder innere (individuelle) Unterschiede, wie Nahrungspräferenzen/-angebot, oder Aktivitätslevel (z.B. mehr Möglichkeit zum Freigang und damit verbundenem Trink- bzw. Fressverhalten, erhöhter Evaporation etc.) (Green et al. 2018). Dass individuelle Faktoren offenbar im Körperwasser eine gewisse Rolle spielen, zeigt sich daran, dass auch Individuum 5 und Individuum 6

sich signifikant voneinander unterscheiden, obwohl sie am selben Tag geschlachtet wurden. So könnten die höheren Werte in Individuum 6 beispielsweise mit einer verstärkten Aktivität und damit einhergehend mit einer verstärkten evaporativen Fraktionierung in den letzten Tagen vor der Schlachtung zu erklären sein. Dass sich die beiden Schlachtungen ebenfalls unterscheiden lassen, deutet auf den vorhandenen Einfluss eines zeitlichen Effekts äußerer (evtl. saisonaler) Faktoren hin. So könnte eine höhere Außentemperatur oder geringere Luftfeuchtigkeit in den Tagen vor der zweiten Schlachtung zur Erhöhung der Körperwasserwerte gegenüber denen der ersten Schlachtung geführt haben.

In einer Studie von Boner & Förstel (2004) schwankten die $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Werte von Rindfleisch von drei nah beieinanderliegenden Standorten in Deutschland saisonal um etwa 4-5 ‰, was sich mit der Gesamtspanne von 4.87 ‰ (alle Individuen) bzw. 3.54 ‰ (nur adulte Tiere) gut vereinbaren lässt. Green et al. (2018) geben an, dass es in einer homogenen Population von Schafen durch Variationen in Verhalten, Physiologie etc. zu inter-individuellen $\delta^{18}\text{O}$ -Schwankungen im Körperwasser von über 3.5 ‰ kommen kann (Standardabweichung 0.1 bis 1.4 ‰) und für homogene Populationen großer Säugetiere durch saisonale und individuelle Unterschiede mit einer Variation von über 2 ‰ zu rechnen sein muss. Diese Angaben passen hervorragend zu den 3.54 ‰ der hier untersuchten, adulten Schweinen (Standardabweichung hier: 1.04 ‰).

Die $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Werte der beiden Ferkel (Ind. 1 und 2) sind gegenüber jenen der adulten Tiere zusätzlich erhöht, was mit dem Stilleffekt erklärt werden kann, da beide Individuen zum Beprobungszeitpunkt noch nicht abgestillt waren und auch noch keine (oder vernachlässigbar wenig) andere Nahrung als Muttermilch konsumierten (siehe **Abbildung 51** und **Tabelle 51**). Hinzu kommt, dass die Muttersau während der Trächtigkeit und Stillphase mit einem erhöhtem Kraftfutteranteil ernährt wurde, welches höhere $\delta^{18}\text{O}$ -Werte aufweist, als das Niedrigenergiefutter. Unerwartet hingegen ist die Tatsache, dass Individuum 1 (Beprobung eine Woche nach der Geburt) einen höheren $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Wert aufweist, als Individuum 2 (Beprobung drei Wochen nach der Geburt) (Differenz: 1.11 ‰). Geht man ausschließlich vom Nahrungsinput (Stilleffekt und Kraftfutteranteil) als alleinige Ursache für die erhöhten Ferkelwerte aus, so sollte Individuum 2 eigentlich höhere Werte aufweisen, da es länger gestillt wurde und somit der Einfluss der Muttermilch hier höher sein sollte, während Individuum 1 nur eine Woche gestillt wurde und die Muttermilch größtenteils verweigerte (selbst bei Flaschenfütterung). Mögliche Gründe hierfür könnte der Gesundheitszustand des jüngeren Ferkels sein, der zum Beispiel zu einer erhöhten Evaporation oder auch veränderter Körpertemperatur geführt haben könnte. Da dieses Ferkel mit einer Woche auch eine deutlich geringere Körpergröße aufwies als das ältere, könnte auch dieser Aspekt eine Rolle gespielt haben (geringere Körpergröße bedeutet größere Körperoberfläche im Verhältnis zur Körpermasse und damit verstärkter fraktionierter Verlust von Sauerstoff über Atemluft und Haut) (Bryant & Froelich 1995, Huertas et al. 1995, Kirsanow & Tuross 2011).

Der Unterschied zwischen den beiden Ferkeln im $\delta^{18}\text{O}$ des Körperwassers ist also wahrscheinlich nicht auf den Stilleffekt, sondern auf sonstige interindividuelle Faktoren zurückzuführen. Im Gegensatz zu Körperbestandteilen mit längeren Turnover-Zeiten zeigen sich im Körperwasser auch in den adulten Tieren große interindividuelle Schwankungen von bis zu 2.79 ‰. Dies kann, wie bereits erwähnt auf verschiedene Ursachen zurückzuführen sein, wie klimatische bzw. wetterbedingte Unterschiede, individuelle Trink- und Aktivitätsmuster, sowie die Ernährungsweise. In allen adulten Tieren sollte sich die Isotopenzusammensetzung bereits an die restriktive Ernährung mit mehr Gras und Silage angepasst haben. Da das Niedrigenergiefutter tendenziell niedrigere $\delta^{18}\text{O}$ -Werte aufweist als das Hochenergiefutter, kann es sein, dass die adulten Tiere auch über den reinen Stilleffekt hinaus von den Ferkeln abweichen. Es ist daher sehr schwer abzuschätzen, wie hoch die Anreicherung im Körperwasser gestillter Individuen alleine aufgrund des Stilleffektes genau ist, denn es kann weder

gesagt werden, welches der beiden Ferkel die bessere Referenz für den unverfälschten Stilleffekt darstellt, noch, welches der adulten Tiere am besten als Vergleich heranzuziehen ist.

Der Mindestunterschied zwischen Ferkel und adulten Schwein beträgt 0.72 ‰ (zwischen Ferkel 2 und Individuum 6), der Maximalunterschied 4.62 ‰ (zwischen Ferkel 1 und Individuum 3). In einer der wenigen Studien zur Anreicherung des Körperwassers durch das Stillen wurde der Urin von gestillten Säuglingen mit dem von mit Leitungswasser angerührter Flaschenmilch gefütterten Babys verglichen und eine Anreicherung von durchschnittlich 1.85 ‰ durch das Körperwasser der Mütter in den gestillten Kindern gefunden (Roberts et al. 1988). Diese Anreicherung ist höher, als die meisten Angaben zum Stilleffekt in mineralisierten Hartgeweben. Während manche Autoren spekulierten, ob dies möglicherweise auf eine unterschiedlich starke Zusatzfütterung mit leitungswasserhaltigen Lebensmitteln zurückzuführen ist, scheint folgende Erklärung auch angesichts der hier untersuchten Daten plausibler: Der Urin der untersuchten Säuglinge, welcher isotopisch dem Körperwasser entspricht (Bryant 1995, Kohn 1996, Luz 1984), spiegelt den vollständigen Stilleffekt wider, weil das Körperwasser sich sehr schnell den aktuellen Einflüssen anpasst. Knochen und Zähne hingegen stellen stets eine Mischisotopie dar. Da beim Menschen kein Zahntyp vollständig während der Stillphase mineralisiert (außer diese wird extrem ausgedehnt, was kulturabhängig in Einzelfällen passieren kann), wird in keinem Zahn der Stilleffekt vollständig ausgeprägt sein. Bei den hier untersuchten Schweinen verhält es sich dagegen anders, da die ersten Molaren nahezu ausschließlich die Stillphase reflektieren. Das könnte erklären, warum die Differenzen zwischen ersten Molaren und den anderen Zahntypen hier deutlich höher sind als die publizierten Angaben zum Ausmaß des Stilleffektes in menschlichen Zähnen (siehe Kapitel zu mineralisierten Hartgeweben ab Seite 191).

Tabelle 51 Differenzen zwischen den $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Werten der Messungen am Gewebswasser der Laufmuskeln für die einzelnen Individuen. Angaben in ‰.

Differenzen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ (Laufmuskel)	Ferkel 2	Individuum 3	Individuum 4	Individuum 5	Individuum 6
Ferkel 1	1.11	4.62	3.62	2.55	1.83
Ferkel 2		3.51	2.51	1.44	0.72
Individuum 3			-1.00	-2.07	-2.79
Individuum 4				-1.07	-1.79
Individuum 5					-0.72

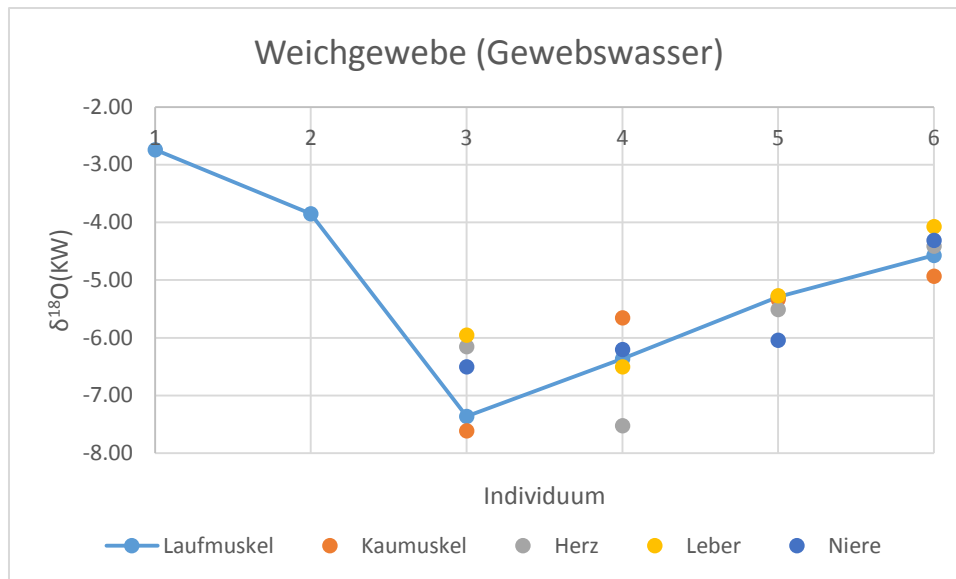


Abbildung 51 $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Verhältnisse nach Gewebe und Individuum. Nur für den Laufmuskel konnten auch Werte für die beiden Ferkel gemessen werden (blau). Wie zu erkennen ist, liegen die Daten der Ferkel am höchsten. Es bestehen jedoch auch deutliche inter-individuelle Unterschiede bei den adulten Tieren.

(1) Lineare Regression

Die erste hier getestete Methode zur Modellierung bzw. Schätzung von $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ basierte lediglich auf dem Input an Trinkwasser ($\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$). Die Gleichung von Longinelli (1984) setzt das Körperwasser in eine direkte lineare Beziehung mit dem Trinkwasser-Input bzw. dem meteorischen Wasser, ohne weitere Faktoren zu berücksichtigen:

$$\delta^{18}\text{O}(\text{KW}) = 0.88 * \delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}}) + 2.1$$

Alle weiteren möglichen Einflussgrößen werden als artspezifisch definiert, unter der Hypothese, dass sie für eine bestimmte Tierart gleichbleibend sind. Wie die Ergebnisse zeigen, ist dieser Ansatz bei weitem nicht ausreichend, um die beobachtete Verteilung der Daten zu erklären. Durch den linearen Charakter der Formel, können die $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Werte lediglich so stark schwanken, wie die Spanne des $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ -Inputs. Dieser Wertebereich ist jedoch zu schmal, um alle Daten der adulten Tiere (geschweige denn die der gestillten Ferkel) zu erfassen. Da keines der getesteten Modelle den Stilleffekt berücksichtigt, ist es nicht weiter verwunderlich, dass die Ferkelproben nicht von ihnen erfasst werden können. Wie sich aber zeigt, kann auch nicht von einem fixen Stilleffekt ausgegangen werden: Der Stilleffekt ist keine feste Fraktionierung, sondern ein komplexer Prozess, der sich aus dem isotopisch angereichertem Input an Muttermilch und den verschiedenen Anreicherungsprozessen im Individuum zusammensetzt (White et al. 2004, Pederzani & Britton 2018). Je nachdem um welches Körpergewebe bzw. welchen Körperbestandteil es sich handelt, wie alt das jeweilige Individuum ist usw., fällt der Stilleffekt unterschiedlich stark aus. Aber auch die Werte des adulten Körperwassers lassen sich nicht vollständig durch die Formel von Longinelli (1984) erklären. Die lineare Regressionsgleichung basiert auf einer sehr geringen Stichprobe von nur 37 Körperwasserwerten, die mit dem jeweiligen lokalen Niederschlag verglichen wurden. Diese Anzahl kann unmöglich repräsentativ für alle Hausschweine der Welt sein.

Bryant & Froelich (1995) korrigierten die Formel statistisch, wodurch das Bestimmtheitsmaß angepasst wurde und sich Steigung und Achsenverschiebung veränderten. Sie kritisierten den Ansatz aber auch

grundlegend, da selbst mit statistischen Korrekturen die vorhergesagten Werte nur so weit streuen können, wie die eingesetzten Trinkwasserverhältnisse und keine weiteren Faktoren berücksichtigt werden. Prinzipiell verfehlen die linearen Vorhersagen nach Longinelli (1984) bzw. Bryant & Froelich (1995) aber nicht den groben $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Wert: Beide Versionen der Formel stimmen zumindest mit einem Teil der gemessenen Werte adulter Schweine überein. Jedoch passen nach der einen Version ein Großteil der $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Werte der ersten Schlachtung nicht in das Modell und nach der anderen ein Großteil der Werte der zweiten Schlachtung. Die vom Stilleffekt betroffenen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Werte würden in jedem Fall Ausreißer darstellen. Es ist also eindeutig feststellbar, dass die einfache lineare Regression, welche $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ zum einzigen Einflussfaktor macht, bei weitem nicht genügt, um die zu erwartende Variation von Sauerstoffisotopenverhältnissen im Körperwasser vorherzusagen.

Selbst innerhalb eines Monats (zeitliche Differenz zwischen den beiden Schlachtungen) kommt es, in der hier untersuchten homogenen Gruppe von Versuchstieren durch andere Faktoren zu solch signifikanten Veränderungen, dass sie den Rahmen des linearen Regressionsmodells sprengen. Dies ist insofern unerfreulich, da es die Untersuchung stabiler Sauerstoffisotope erheblich erschwert. Das Trinkwasser (oder meteorische Wasser) stellt in der Regel eine relativ leicht bestimmbare, oder zumindest gut schätzbare Größe dar (Bowen 2010). Dass diese Größe nicht ausreicht, um die zu erwartenden $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Verhältnisse einer Tierart an einem Standort befriedigend vorherzusagen, bedeutet, dass entweder mehr Einflussgrößen bestimmt oder geschätzt werden müssen, um die Vorhersagen zu verfeinern, bzw. zu erweitern, oder aber dass die angegebenen Unsicherheitsfaktoren der artspezifischen Gleichungen deutlich erhöht werden müssen (was vermutlich bei größeren Stichproben auch der Fall wäre). Im hier untersuchten Fall mit kontrolliert gehaltenen, nah verwandten Individuen, müsste demnach bereits ein Unsicherheitsbereich von mindestens $\pm 2 \text{ ‰}$ angegeben werden um alle Proben zu erfassen. Das erscheint wenig sinnvoll, da damit Unterschiede zwischen verschiedenen Arten und sogar Standorten kaum noch bestimmbar wären. Offensichtlich ist das Trinkwasser alleine also nicht geeignet, um ein brauchbares Modell von $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ zu erstellen, was sich mit in anderen Arbeiten geäußerten Zweifeln deckt (Pollard et al. 2011, Lightfoot & O'Connell 2016). Eine Erweiterung des Grenzwertbereiches ließe sich allerdings dann erreichen, wenn die saisonale Veränderung von $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ berücksichtigt würde. Dieses schwankt laut OIPC über das Jahr hinweg um mehr als 9 ‰ .

Für das Trinkwasser dieser Studie ist dies jedoch irrelevant, da es erwiesenermaßen nicht direkt aus Niederschlagswasser bestand und weitestgehend konstant blieb. Zieht man jedoch komplexere Vorhersagemodelle hinzu, so wirken sich die Schwankungen im lokalen $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ indirekt auf das Futter und Futter-Wasser aus und können dadurch das Spektrum der zu erwartenden Werte erweitern. In der Wachstumsphase (ca. März bis Oktober) schwankt der OIPC-Wert des lokalen Niederschlags immerhin noch um $7\text{-}8 \text{ ‰}$. Auch wenn $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ weiterhin das Körperwasser am stärksten beeinflusst, können solch starke Unterschiede im Futter evtl. zu den beobachteten Schwankungen im Körperwasser beitragen.

(2) Massebilanz-Modelle

Es wurden daher auch verschiedene Massebilanz-Modelle anhand der gemessenen Proben getestet, die unter anderem das Futter als Input in den Organismus berücksichtigen. Das Miteinbeziehen von mehr Faktoren birgt den Vorteil, dass mehr lokale und innerartliche Variabilität in die Vorhersagen einfließen kann. Andererseits stellt jede zusätzliche Einflussgröße auch einen weiteren Unsicherheitsfaktor dar, besonders wenn auch mit Werten (z.B. für Fraktionierungsfaktoren, Flussraten oder Input-Isotopenverhältnisse) aus der Literatur gerechnet werden muss: Dabei wird von

manchen Autoren bereits die lineare Regression mit nur auf einer Einflussgröße basierenden Schätzung, aufgrund der sich ergebenden Fehlerfortpflanzung kritisch gesehen (Pollard et al. 2011). Dies ist in allen hier getesteten Massebilanz-Modellen der Fall. Das komplexeste hiervon ist das Modell nach Bryant & Froelich (1995) mit der Formel (siehe auch Modellbeschreibung ab Seite 117):

$$\delta^{18}\text{O}(\text{KW}) = \frac{\text{TWF} - 0.5\text{RqH}}{\text{TWF} + \text{RqH}} \delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}) + \frac{\text{H}(1.5\text{Rq} - 1)}{\text{TWF} + \text{RqH}} \delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O}) + \frac{17.2\text{H} + 16.2\text{EWL} - 38.8\text{RqH}}{\text{TWF} + \text{RqH}}$$

Die Hypothese lautet, dass die artspezifischen Unterschiede als Unterschiede der Körpermasse aufgefasst und beschrieben werden können. Da somit viele Größen anhand der Körpermasse modelliert werden, ist das Modell universell und artübergreifend anwendbar, ohne dass (wie beispielsweise bei Kohn (1996)) eine Vielzahl physiologischer Parameter experimentell bestimmt werden muss. Das Bryant-Modell konnte also gut auf die Daten dieser Studie angewendet werden. In der Tat erweitert sich der Grenzwertbereich durch das Hinzufügen weiterer Parameter im Vergleich zum linearen Ansatz und es werden zumindest mehr Werte erfasst, als vom linearen Modell. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass auch hier nicht die volle Bandbreite isotopischer Variation im Körperwasser erfasst wird, selbst dann nicht, wenn die äußersten Grenzen der Einflussgrößen ausgereizt werden (100 % von nur einem Futtertyp). Das liegt jedoch nicht nur daran, dass die Grenzwertspanne des Modells zu gering ist, sondern kommt auch dadurch zustande, dass die Spanne insgesamt gegenüber den Werten adulter Tiere nach oben hin verschoben ist. Die vom Stilleffekt betroffenen Proben sollten vom Bryant-Modell (und auch den anderen Massebilanz-Modellen) nicht erfasst werden, da Effekte, die speziell auf laktierende, gestillte und heranwachsende Tiere einwirken, ausdrücklich nicht berücksichtigt werden. Streng genommen waren auch die geschlachteten Schweine noch nicht vollständig ausgewachsen, was möglicherweise zu einer gewissen Unsicherheit in den Vorhersagen führen kann, da bei einem noch wachsenden Tier die Inputs nicht im Netto-Gleichgewicht mit den Outputs stehen, wie es das Modell postuliert.

Besonders bei Schweinen muss die Problematik der Gewichtszunahme über das Leben hinweg hervorgehoben werden: Die hier untersuchten Testindividuen wurden im Vergleich zu den allermeisten heute gezüchteten Hausschweinen deutlich später geschlachtet. In nahezu allen modernen landwirtschaftlichen Fragestellungen, die sich mit Sauerstoffisotopen in Schweinen beschäftigen, müsste eigentlich ein angepasstes, bzw. erweitertes Massebilanz-Modell verwendet werden, welches einerseits die Körpermasse im Bryant-Modell als Differenzialgleichung in Abhängigkeit des Alters beschreibt (falls $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ über die Körpermasse modelliert wird) und andererseits einen Netto-Zuwachs berücksichtigt, also ein Ungleichgewicht zwischen den ein- und ausfließenden Flussraten. Selbst in historischen und archäologischen Zeiten ist aus Gründen der Wirtschaftlichkeit davon auszugehen, dass Schweine teilweise bereits vor dem vollständigen Erreichen des Erwachsenenalters geschlachtet wurden, da sie im Gegensatz zu den meisten anderen Nutztieren keine Sekundärleistungen, wie Milch, Eier oder Arbeitskraft liefern und somit zu der Zeit geschlachtet wurden, in der sie den größten Kosten-Nutzen-Wert erbrachten.

Auch für archäologische Fragestellungen könnte das Miteinbeziehen einer Wachstumskomponente also durchaus Vorteile bringen, insbesondere dann wenn am Material ein subadultes Alter nachgewiesen werden kann. Die Datenlage dieser Arbeit reichte leider nicht aus, um ein solches, angepasstes Modell zu erstellen, weswegen es hier nur theoretisch diskutiert werden kann. In ein solches Wachstumsmodell könnte theoretisch auch der Stilleffekt, und somit sehr junge Individuen integriert werden: Die Inputs könnten dann für säugende Tiere auf die Muttermilch (TW und $\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}}$ können zusammengefasst werden und entsprechen dann dem KW der Muttersau, Futter-O entspricht TR der Muttermilch) und den atmosphärischen Sauerstoff (O_2) reduziert und für die entsprechende

Körpergröße bzw. Wachstumsphase über die innerkörperlichen Reaktionen und Outputs $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ und das jeweilige Ausmaß des Stilleffektes vorhergesagt werden.

Für die hier untersuchten adulten Schweine kann dennoch mit einer gewissen Sicherheit angenommen werden, dass wachstumsbedingte Faktoren nur noch eine untergeordnete und zu vernachlässigende Rolle für das Gleichgewicht der Stoffflussraten spielen. Unter dieser Annahme kann nun diskutiert werden, warum das Bryant-Modell insgesamt etwas zu hohe $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Werte vorhersagt bzw. die niedrigeren Messwerte nicht erfasst. Wie sich in der Auswertung zeigte, hat die Variation des Gewichtes nur bei erheblichen Unterschieden in der Körpermasse (z.B. zwischen Ferkel und Schwein) einen merklichen Einfluss auf das Ergebnis der Modellvorhersage nach Bryant & Froelich (1995). Bei den beobachteten Gewichtsschwankungen zwischen den geschlachteten, adulten Tieren (ca. 90-105 kg) spielt dieser Faktor so gut wie keine Rolle. Masseunterschiede können also nicht verantwortlich sein für die Differenz zwischen Messwerten und Vorhersage.

Ein weiterer potentieller Aspekt, der zu unterschiedlichen Ergebnissen bei der Modellrechnung führen kann ist der Respirationsquotient (Rq), welcher von der Zusammensetzung der Nahrung abhängt und beschreibt, wieviel CO_2 im Verhältnis zu konsumiertem O_2 produziert wird. Er kann aber sinnvollerweise nur zwischen 0.71 (100% Protein) und 1 (100% Kohlenhydrat) schwanken. Auch für diese Werte wird keine maßgebliche Änderung des Modellergebnisses erzielt. Auch das Verhältnis von Wasser zu Futter (Trockenmasse) kann nicht der Grund sein, warum die Vorhersagen des Bryant-Modells nicht weit genug herunterreichen. Dies wurde bis zu einem (bereits sehr unplausiblen) Verhältnis von 7:1 von Wasser zu Futter-O getestet. Selbst bei einer so hohen Menge an Trinkwasser, verschob sich der untere Grenzwertbereich des Modells kaum merklich und sicherlich nicht ausreichend nach unten. Ebenso wurde vergeblich versucht, über eine Variation der Zusammensetzung des Futters und somit des $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$ - und $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$ Inputs (z.B. Verhältnis von Getreide zu Kartoffeln), eine ausreichende Erweiterungen der Modellgrenzen zu erreichen. Demnach können die Inputs in den Körper (O_2 , TW, $\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}}$ und Futter-O) und deren Verhältnisse zueinander nicht verantwortlich dafür sein, dass das Bryant-Modell nicht alle beobachteten Werte adulter Tiere vorhersagen kann.

Es ist eher wahrscheinlich, dass individuelle Variationen den Ausschlag geben, wie der evaporative Wasserverlust oder der Gesamtwasserfluss und sich dadurch eine höhere Variabilität ergibt, als allein über die Modellierung mittels Körpermasse möglich ist. Senkt man zum Beispiel den Anteil an fraktionierten Wasserdampfverlust (oder alternativ den Wert des Fraktionierungsfaktors), so lassen sich mit den Massebilanz-Modellen Werte errechnen, die niedrig genug sind, um alle $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Daten zu erfassen. So führt die Verwendung des Fraktionierungsfaktors nach Schoeller et al. (1986) ($\beta_1 \approx 0.992$) im Vergleich zu dem von Bryant & Froelich (1995) angenommenen Wert ($\beta_1 \approx 0.9838$) zu einer Gesamtverschiebung um 1.15 ‰. Des Weiteren kommt es bei Veränderungen des Anteils an Wasserdampfverlust (F_7) im Vergleich zum Gesamtsauerstoffoutput um nur 2 % bereits zu Verschiebungen von 0.5 bis 0.7 ‰ (je nach Modellversion). Einfach ausgedrückt bedeutet dies zum Beispiel, dass andere (wärmere, trockenere) Wetterverhältnisse bei der zweiten Schlachtung zu einem höheren evapotranspirativen Wasserverlust geführt haben, der sich in einer Größenordnung befand, wie von Bryant & Froelich (1995) pauschal angenommen. Bei der ersten Schlachtung jedoch waren die Wetterverhältnisse (oder aber auch das Aktivitätslevel der Tiere) anders (feuchteres, kühleres Wetter oder geringere Aktivität), sodass der Anteil an fraktioniertem Wasserverlust und somit auch die daraus resultierenden $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Verhältnisse geringer waren. Demnach gibt es ausschlaggebende individuelle Unterschiede, die sich nicht nur auf die unterschiedliche Körpermasse reduzieren lassen, wodurch auch das Bryant-Modell nicht sämtliche beobachtete Variation vorhersagen kann.

Auch bei den Gretebeck-Modell-Versionen wird die tatsächliche Bandbreite an $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ nicht erreicht, bzw. nur wenn man die theoretischen Extremwerte für das Futter einsetzt. Das Gretebeck-

Modell ist im Vergleich zu Bryant & Froelich (1995) deutlich vereinfacht und rechnet noch mehr mit Schätzwerten für bestimmte Flussraten und Fraktionierungsfaktoren (siehe auch detaillierte Modellbeschreibungen ab Seite 117):

$$^{18/16}\text{O(KW)} = \frac{0.62\delta^{18}\text{O(H}_2\text{O)} + 0.14\delta^{18/16}\text{O(Futter-O)} + \alpha_2 0.24\delta^{18/16}\text{O(O}_2\text{)}}{0.62 + \beta_1 0.14 + \beta_2 0.24}$$

Die original von Gretebeck et al. (1997) publizierten Flussraten stammen aus Experimenten am Menschen (Schoeller et al. 1986). Diese wurden beispielsweise von Podlesak et al. (2008) ohne weitere Modifikation auf Ratten übertagen. Dies kann höchst kritisch gesehen werden, da Ratten und Menschen über völlig andere physiologische Voraussetzungen verfügen und sich in vollständig anderen Größenordnungen bewegen. Trotzdem geben Podlesak et al. (2008) an, dass das Gretebeck-Modell auch für Ratten zu guten Vorhersagen führt. Begründet wird dies damit, dass die Flussraten-Werte basierend auf der Stöchiometrie verstoffwechselter Nahrung bestimmt wurden und somit universell gültig sein sollten. Dennoch ist es zweifelhaft, dass sich alle In- und Output-Flussraten auf die reine Verstoffwechselung von Kohlenhydraten reduzieren lassen. Auch andere, vom Metabolismus unabhängige Aspekte (wie Hitzeregulation etc.) spielen dabei eine Rolle (Luz et al. 1984). Die Übertragung von Menschen-Daten auf Schweine ist ein weitaus geringerer Schritt, da beide sich in Körpermasse, Ernährungsweise und Physiologie stark ähneln. Doch selbst wenn man Menschen als Modellorganismen für Schweine annimmt, können die Außenbedingungen und physiologische Faktoren wie Aktivität, Hitzeregulation, Futterzusammensetzung etc. die entsprechenden Flussraten erheblich beeinflussen.

Außerdem zeigt sich, wie schon bei Bryant & Froelich (1995), dass korrekte Literaturangaben, zum Beispiel für Fraktionierungsfaktoren und/oder Flussraten ausschlaggebend sind. Gerade bei Fraktionierungsfaktoren kann ein minimaler Unterschied bereits immense Auswirkungen auf das Ergebnis der Modellrechnung haben. Auch die verschiedenen Varianten des Gretebeck-Modells zeigen dies eindrucksvoll. Allein die Verwendung verschiedener publizierter Fraktionierungsfaktoren für die Fraktionierung von Sauerstoff in der Lunge (α_2), von Wasserdampf über Mund, Nase und Haut (β_1) oder von abgegebenem Kohlenstoffdioxid (β_2), die sich teilweise nur in der dritten Nachkommastelle unterscheiden, kann im Endergebnis bereits zu Unterschieden von mehreren Promille führen. Allein von den Messwerten ausgehend, passt von allen Modellversionen (inklusive des Bryant-Modells), die Gretebeck-Modellversion mit Fraktionierung nach Podlesak et al. (2008) am besten zur beobachteten Datenlage. Dies widerspricht den Erwartungen, da in dieser Studie Ratten untersucht wurden, die sich (im Gegensatz zu Menschen, oder dem körpermasseangepassten Ansatz von Bryant) sehr stark von Schweinen unterscheiden. Vermutlich wurden hier eher zufällig Fraktionierungsfaktoren gewählt, die zu den untersuchten Schweinen am besten passen. Auch die Bryant-Version des Gretebeck-Modells (also das Gretebeck-Modell mit Fraktionierungsfaktoren nach Bryant (1995)) weicht, wie das Bryant-Modell selbst zu weit nach oben hin ab. Dies deutet darauf hin, dass tatsächlich die verwendeten Fraktionierungsfaktoren hierfür verantwortlich sind und auch den größten Einfluss auf die Modellrechnung haben. Am schwersten zu erfassen ist das Ausmaß des fraktionierten Wasserdampfverlustes aus dem Körper. Tatsächlich wurde bei Bryant der Wert für die Wasserdampf-Output-Fraktionierung eher willkürlich gewählt, als Schätzung basierend auf Daten zum Verlust über den Atem (-8.3 %) und über die Haut (ca. -19 bis -24 %) (Bottinga & Craig 1968, Schoeller et al. 1986). Es ist wahrscheinlich, dass gerade dieser Aspekt, der fraktionierte Wasserverlust, eine ausschlaggebende Rolle spielt und auch zwischen- und innerartlich am stärksten variiert.

Schließlich könnte es theoretisch noch sein, dass bei der Messung der Umweltproben nicht die gesamte, den Tieren verfügbare Bandbreite erfasst werden konnte. Obwohl es unwahrscheinlich ist, kann es sein, dass bestimmte Tiere aus unbekannten Trinkwasserquellen getrunken oder nicht

erfasstes Futter mit unterschiedlicher Isotopie konsumiert haben. Dies kann in einem nicht vollständig kontrollierten System nicht zu einhundert Prozent ausgeschlossen werden. Trotzdem ist die Wahrscheinlichkeit hierfür extrem gering.

Im Großen und Ganzen führen die Massebilanz-Modelle zu einer höheren Spannbreite und erfassen somit auch mehr der gemessenen Daten. Das Berücksichtigen zusätzlicher äußerlicher und physiologischer Faktoren kann also durchaus zu einem besseren Verständnis für das Zustandekommen von $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Körperwasser beitragen. Trotzdem liefert keines der getesteten Modelle wirklich überzeugende Grenzwerte für die untersuchte Population. Das kann bei Bryant & Froelich (1995) zum einen daran liegen, dass Wachstum und wachstumsbedingte Änderungen der Flussraten nicht berücksichtigt werden können und dass das Ausmaß und die Variabilität des fraktionierten Verlustes von Wasser fehleingeschätzt wird. Letztgenanntes gilt ebenso für das Gretebeck-Modell. Generell muss auch festgehalten werden, dass unterschiedliche Angaben zu Fraktionierungsfaktoren einen extrem hohen Einfluss auf das Modell haben und sich somit die Frage stellt, welcher Fraktionierungsfaktor jeweils der richtige ist und ob Ungenauigkeiten bei der Wahl desselben nicht jegliche andere Variation irrelevant werden lassen.

b) Trockenmasse

Die organische Trockenmasse von Weichgeweben spiegelt andere Aspekte (und Zeiträume) des $\delta^{18}\text{O}$ -Haushaltes eines Tieres wider, als das Körperwasser. In **Abbildung 50** ist angedeutet, dass die Repräsentationszeiten von $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ gegebenenfalls länger sind als die des Körperwassers. Dies ist, wie auch im Folgenden diskutiert wird, stark vom jeweiligen Gewebe abhängig. So ist der Turnover von Muskelfleisch relativ schnell und findet innerhalb von Tagen bis Wochen statt. Der Turnover innerer Organe variiert stark, je nach Stoffwechselaktivität des jeweiligen Organs und kann deutlich schneller als der des Muskelfleisches ausfallen. Das Spektrum der Turnover-Zeiten liegt hier bei wenigen Tagen bis mehreren Monaten (Tieszen et al. 1983, Rucklidge et al. 1992, Bowen et al. 2005, Rummel et al. 2007, Webb et al. 2017). Laut Phillips & Eldridge (2006) weisen Muskeln eine geringere Turnover-Rate auf als Lebergewebe, welches extrem schnellen Turnover unterworfen ist (vergleichbar mit dem von Blut). Weiler (2005) gibt an, dass die fraktionelle Proteinsynthese in der Leber 20 % pro Tag beträgt, in den Nieren 17 %, im Herzgewebe lediglich 6 % und in normalem Muskelgewebe nur 5 %.

Während das Körperwasser aller untersuchten Gewebetypen (Muskeln und Organe) für ein Individuum zu einem bestimmten Zeitpunkt relativ einheitlich zu sein scheint, ließen sich für die $\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnisse der organischen Bestandteile eindeutige Unterschiede feststellen. Wie im Ergebnisteil festgestellt, ist die Gesamtheit aller $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Daten im Gegensatz zu den $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Daten auch nicht normalverteilt (auch nicht ohne die Ferkeldaten). Außerdem ist hier auch die Streuung der Daten deutlich höher, als die der $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Proben. Hier scheinen also eindeutig gewebespezifische Faktoren eine große Rolle für das Zustandekommen der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte einzunehmen, welche einen stärkeren Einfluss haben als die saisonalen, zeitlichen bzw. individuellen Faktoren, welche bei $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ vorherrschen. So lassen die Daten vermuten, dass bestimmte Gewebe bzw. Gewebegruppen individuelle Bildungseigenschaften besitzen. Welche das im Einzelnen sind, lässt sich nicht mit Sicherheit sagen, aber neben einer gewebespezifischen Fraktionierung könnten auch die Turnover- und Stoffwechselrate eine tragende Rolle spielen (Tuross et al. 2008, O'Grady et al. 2012).

Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass Gewebe sich voneinander isotopisch umso mehr zu unterscheiden scheinen, je verschiedener auch ihre jeweiligen Eigenschaften sind. So ist der Unterschied zwischen Muskelgeweben und Stoffwechselorganen besonders signifikant, während die Unterschiede innerhalb dieser Gruppen weniger stark ausgeprägt sind. Aber auch innerhalb der vermeintlich ähnlichen

Gewebetypen zeigen sich signifikante Unterschiede, die einer Diskussion bedürfen. So weichen die Laufmuskel-Daten eindeutig von den anderen Muskelgeweben (Herz und Kaumuskel) nach unten hin ab. Herz und Kaumuskel hingegen unterscheiden sich nicht signifikant voneinander. Zunächst würde man möglicherweise vermuten, dass Lauf- und Kaumuskel einander stärker ähneln sollten als das Herz, welches in seiner Funktion und Zusammensetzung eine Ausnahme unter den Muskelgeweben darstellt. Die beobachteten Werte lassen sich möglicherweise mit der Stoffwechselaktivität, bzw. der Aktivität der jeweiligen Gewebetypen erklären: Während Herz und Kaumuskel bei den untersuchten Individuen regelmäßig aktiv waren (das Herz schlägt unentwegt und Mastschweine fressen täglich viel und ausgiebig), könnte es bei in Gefangenschaft lebenden Nutztieren sein, dass die Laufmuskulatur weniger intensiv und regelmäßig beansprucht wird. Es könnte anhand der gemessenen Daten also die Hypothese aufgestellt werden, dass der $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Wert eines Gewebes umso höher ist, desto größer die metabolische Aktivität des jeweiligen Gewebetypen ist. Zu dieser Hypothese passt auch die Tatsache, dass stoffwechselaktive Organe wie Niere und Leber noch höhere Werte aufweisen als die Muskelgewebe.

Die Leberproben weichen am deutlichsten vom Rest der $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Daten nach oben hin ab, was möglicherweise auch damit zu tun hat, dass die Leber ein hochgradig stoffwechselaktives Organ ist, in dem viel metabolische Aktivität vonstattengeht (Phillips & Eldridge 2006, Biondi et al. 2013). Die Leber übernimmt im Körper eine Vielzahl verschiedener metabolischer Aufgaben, wie die Bildung von Glukose, Ketonkörpern, Gallensäure und verschiedenen Proteinen, die Speicherung von Fett, Glykogen und Vitaminen (und deren Abbau und Bereitstellung bei Bedarf), sowie den Abbau von Giftstoffen, Blutbestandteilen und weiteren Abfallstoffen. Es handelt sich also um viele verschiedene anabole und katabole Prozesse, die zum Teil mit sehr hohen Stoffwechselraten stattfinden (Duncan et al. 2009, Fischler 2013, Rosenthal 2013). Damit könnte einerseits metabolisches Wasser (und damit die höheren $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von Futter-O und O_2) eine größere Rolle bei der Bildung des Gewebes spielen und andererseits ist die Turnover-Rate deutlich höher, als in anderen Geweben, was zu einer stärkeren Fraktionierung bei der Bildung des Gewebes aus dem umgebenden Milieu führen könnte und andere Repräsentationszeiten zur Folge hat (Bowen et al. 2005, Biondi et al. 2013). Auch die Niere ist vergleichsweise stoffwechselaktiv und weist als Filter- und Exkretionsorgan einen hohen Durchlauf an Körperflüssigkeit auf (Guyton & Hall 1986). Stoffwechselaktivere Organe reagieren somit auch schneller auf äußere Änderungen der Gegebenheiten, während metabolisch trägere Gewebe weiter in der Vergangenheit liegende Zustände widerspiegeln (Bowen et al. 2005). Es ist allerdings unwahrscheinlich, dass die Stoffwechselaktivität eines Gewebes der alleinige Faktor beim Zustandekommen des $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Wertes ist. Vermutlich gibt es für jedes Gewebe einen spezifischen biochemischen Stoffwechselweg, der die Fraktionierung zwischen Gewebe und den jeweiligen Inputs bestimmt. Wie bei den $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ -Werten könnte es auch sein, dass bestimmte Gewebe mehr oder weniger stark vom Darmwasser und nicht vom Körperwasser beeinflusst werden.

Wegen der großen Unterschiede, die sich bereits zwischen Leber und Niere oder Lauf- und anderen Muskeln zeigen, macht es vermutlich wenig Sinn einzelne Gewebetypen zu Gruppen zusammenzufassen, wenn man auf der Suche nach spezifischen Fraktionierungsfaktoren ist. Dies bedarf weiterer ausgedehnter Experimente, die das Ausmaß dieser Arbeit übersteigen würden. Festgehalten werden kann jedoch (besonders mit Blick auf Studien, die sich mit der Untersuchung von tierischen Produkten und deren Herkunft anhand von $\delta^{18}\text{O}$ beschäftigen), dass bei der Interpretation von $\delta^{18}\text{O}$ -Daten tierischer Weichgewebe darauf geachtet werden muss, welche Gewebe beprobt werden und zu prüfen ob diese miteinander vergleichbar sind. So könnte bereits der Vergleich von Fleisch aus der Bewegungsmuskulatur an Standort A mit Fleisch aus der Kaumuskulatur an Standort B die Ergebnisse verfälschen und somit zu fehlerhaften Schlussfolgerungen führen. Möglicherweise

erklärt diese Komplexität auch zum Teil, warum es in der Vergangenheit zu Problemen bei Studien an tierischen Weichgeweben mittels $\delta^{18}\text{O}$ -Analysen gekommen ist (Franke et al. 2008, Tuross et al. 2008). Die $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Werte der Ferkelpuben widersprechen der Erwartung, dass sie aufgrund des Stilleffektes gegenüber jenen der adulten Tiere erhöht sein sollten, wie es beim zugehörigen Körperwasser auch der Fall ist. Eine eindeutige Erklärung hierfür konnte nicht gefunden werden. Tatsächlich wurden nur jeweils eine $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Probe von jedem Ferkel genommen, beide Male wurde der Laufmuskel beprobt. Interessanterweise passen diese Werte (Ind. 1: 11.02 ‰, Ind. 2: 11.94 ‰) zu den Laufmuskel-Daten der adulten Schweine (Spanne: 10.21 ‰ bis 12.01 ‰) und das ohne eindeutige Abweichung nach oben. Es zeigt sich also auch hier wieder, dass bei der Untersuchung von $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Proben nur dieselben Gewebe miteinander verglichen werden sollten.

Wieder liegt der $\delta^{18}\text{O}$ -Wert von Individuum 1 etwas höher als der von Individuum 2, was sich wiederum mit den Daten des Körperwassers deckt und insofern verwundert, dass der Stilleffekt in Ferkel 2 eigentlich stärker ausgeprägt sein sollte. Auch hier könnten der Gesundheitszustand und die Körpergröße eine Rolle gespielt haben. Möglicherweise wird der vorhandene Stilleffekt auch durch andere Einflussfaktoren verschleiert, die zu großen Abweichungen der $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Werte der Laufmuskeln innerhalb der adulten Tiere geführt haben (wie z.B. Futterwechsel etc.).

Für die Weichgewebe ist es also insgesamt sowohl für $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ als auch für $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ schwer verlässliche Aussagen über den Stilleffekt zu treffen, da jeweils nur ein Gewebetyp (Laufmuskel) sowohl für die Ferkel, als auch für die adulten Tiere beprobt werden konnte. Bei der Trockenmasse scheint es sich allerdings so zu verhalten, dass keinerlei Anreicherung der $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Werte in den Laufmuskeln der jungen Individuen gegenüber den adulten erkennbar ist. Die Unterschiede zwischen den adulten Tieren sind zum Teil höher als jene zwischen den Ferkeln und den Schweinen und auch höher als die Unterschiede zwischen den beiden Ferkeln (siehe **Tabelle 52**). Selbst die Individuen 3 und 4, welche zeitgleich geschlachtet wurden, unterscheiden sich in ihren $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Werten um 1.73 ‰. Außerdem liegen die $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Werte der adulten Laufmuskeln zum Teil höher als die der beiden Ferkel (siehe **Abbildung 52**). Es hat den Anschein, dass in Weichgeweben, oder zumindest im Muskelgewebe zusätzliche Faktoren eine Rolle spielen, die den Stilleffekt überlagern. So könnte der Gesundheitsstatus, bzw. die Körpergröße von Ferkel 1 zu einer kurz- bis mittelfristigen Veränderung des Wasserhaushaltes oder Metabolismus geführt haben, was zu den höheren Werten gegenüber Ferkel 2 geführt hat, jedoch nicht lange genug anhielt, um auch in den mineralisierten Hartgeweben einen sichtbaren Effekt zu erzielen. Möglich ist auch, dass im Muskelgewebe die physische Aktivität eine Rolle spielt. Dies würde erklären, warum selbst bei zeitgleich beprobten Tieren große inter-individuelle Unterschiede bestehen. Es kann selbstverständlich auch nicht mit absoluter Sicherheit ausgeschlossen werden, dass die Messungen dieses Probenotyps inakkurat sind und sich deswegen nicht die zu erwartende Erhöhung der Ferkel-Werte zeigt. Letztendlich lässt sich bei den $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Werten keine zufriedenstellende Einschätzung des Stilleffektes anstellen.

Tabelle 52 Differenzen zwischen den $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Werten der Messungen an der Trockenmasse der Laufmuskeln für die einzelnen Individuen. Angaben in ‰.

Differenzen $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ (Laufmuskel)	Ferkel 2	Individuum 3	Individuum 4	Individuum 5	Individuum 6
Ferkel 1	0.84	-0.93	0.80	-0.71	-1.00
Ferkel 2		-1.77	-0.03	-1.54	-1.83
Individuum 3			1.73	0.23	-0.06
Individuum 4				-1.51	-1.80
Individuum 5					-0.29

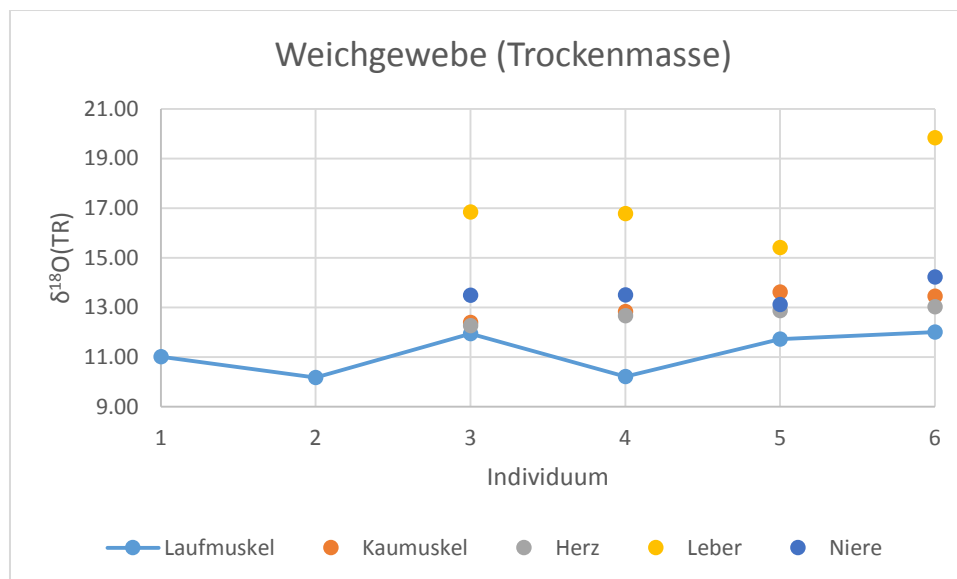


Abbildung 52 $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Verhältnisse nach Gewebe und Individuum. Nur für den Laufmuskel konnten auch Werte für die beiden Ferkel gemessen werden (blau). Wie zu erkennen ist, liegen die Daten der Ferkel in diesem Fall nicht oberhalb der adulten Werte. Die inter-individuelle Unterschiede bei den adulten Tieren sind teilweise höher, als die zwischen adulten Tieren und Ferkeln, bzw. zwischen den beiden Ferkeln.

Im Mittel weichen $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ derselben Probe um 19.32 ‰ voneinander ab, jedoch mit starken Unterschieden zwischen den Gewebetypen. Generell wird angenommen, dass das Körperwasser die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von Geweben stark beeinflusst (Hobson 1999, Podlesak et al. 2008, O'Grady et al. 2012). Da an der Entstehung eines Gewebes jedoch viele unterschiedliche anabole und katabole Reaktionen beteiligt sind, welche in ihren Auswirkungen auf den $\delta^{18}\text{O}$ -Haushalt nicht alle im Detail bekannt sind, kann es hierbei durchaus zu gewebespezifischen Unterschieden kommen (Kohn 1996, Tuross et al. 2008, Kirsanow & Tuross 2011, Michal & Schomburg 2012, Welle 2012). Am geringsten ist der Unterschied innerhalb der Laufmuskeln (17.37 ‰; nur adulte Individuen), gefolgt von Herz- (18.61 ‰) und Kaumuskel (18.95 ‰) und den höchsten Werten bei den Stoffwechselorganen, wobei die Leber die mit Abstand höchsten Differenzen zwischen Körperwasser und Trockenmasse aufweist (22.67 ‰) und die Niere eher näher bei den Muskelgeweben liegt (19.35 ‰).

Diese Differenzen deuten an, dass in den verschiedenen Gewebetypen das Körperwasser (oder aber auch das Trinkwasser) für die Bildung eine unterschiedlich große Rolle spielt: Während der $\delta^{18}\text{O}$ -Wert der Muskeln am stärksten bzw. direktesten mit dem Körperwasser zusammen zu hängen scheint, ist vor allem die Leber auch noch von anderen Faktoren beeinflusst. Die Differenzen zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ der Laufmuskeln der Ferkel sind mit 13.76 ‰ (Ind. 1) bzw. 14.03 ‰ (Ind. 2) interessanterweise deutlich geringer, als die der entsprechenden adulten Laufmuskeln. Das könnte evtl. das Fehlen eines sichtbaren Stilleffektes in den $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Ergebnissen der Ferkel erklären: Geht man davon aus, dass wie bei der Modellierung der $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ -Verhältnisse nicht das Körper- sondern das Darmwasser einen entscheidenden Einflussfaktor für die $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Werte darstellt, welches sich aus Körperwasser, Trinkwasser und Futter zusammensetzt, so würde die Muttermilch zwar gegenüber dem Trinkwasser erhöht sein, jedoch in adulten Tieren der $\delta^{18}\text{O}$ -Wert des Futters ($\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$) einen direkteren Einfluss haben, weil die entsprechenden Aminosäuren direkt von dort übernommen werden können. Da die $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$ -Werte noch deutlich höher sind als die des Körperwassers der Muttersau, ließe sich erklären, warum die $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Werte der Ferkel niedriger sind als die der adulten Schweine. Allerdings stellt sich dann die Frage, warum dasselbe nicht auch auf die $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ -Ergebnisse zutrifft, in welchen der Stilleffekt eindeutig erkennbar ist. Möglicherweise ist die Zusammensetzung des Darmwassers, welche am Ende die $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Verhältnisse eines Gewebes festlegt, ebenfalls von Gewebe zu Gewebe unterschiedlich (manche Gewebe würden sich dann eher

aus dem Körperwasser bzw. (indirekt) dem Trinkwasser speisen und andere verstärkt aus den organischen Futterbestandteilen). Kirsanow & Tuross (2011) stellten bereits fest, dass unterschiedliche Probestypen von Versuchstieren das Trinkwasser in unterschiedlichem Ausmaß reflektieren. Auch Tuross et al. (2008) stellten Unterschiede in den $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Werten unterschiedlicher Gewebe von Hausschweinen fest. Als mögliche Ursache wurde von den Autoren ein komplexes gewebespezifisches Zusammenspiel aus der Mischung verschiedener Inputs und Fraktionierung postuliert.

Generell ist die Wertespanne der $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Daten (adulte Tiere) selbst für ein und dasselbe Gewebe relativ hoch. Am stärksten schwanken die Leberdaten mit einer Wertespanne von über 4 ‰. Die niedrigste Spanne ist im Herzmuskel vorhanden, mit unter 1 ‰. Auch hier scheinen sich verschiedene Gewebetypen unterschiedlich zu verhalten und innere bzw. äußere Schwankungen unterschiedlich stark abzubilden. Die Leber scheint hier am sensibelsten auf Veränderungen zu reagieren. Es zeigt sich also erneut, dass es für die Interpretation von $\delta^{18}\text{O}$ -Daten ausschlaggebend ist, welches Weichgewebe betrachtet wird.

2. Borsten

Auch die untersuchten Haarproben stellen ein organisches Gewebe mit hohem Proteinanteil dar, welches im Prinzip ähnlich gebildet werden sollte wie andere proteinbasierte Körpergewebe. Es stellt aber insofern einen Sonderfall dar, dass es zum einen biologisch inert ist und somit nach seiner Bildung keinem körperinternen Turnover mehr unterliegt und zum anderen handelt es sich bei Borsten und Haaren um externe Strukturen, welche der Außenwelt und deren Einflüssen ausgesetzt sind. Dies hat zur Folge, dass solche äußeren Faktoren das Potential besitzen, die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der bereits in ihrer Bildung abgeschlossenen Haare verändern und damit die eigentlichen Isotopenverhältnisse verfälschen können. Tatsächlich ist dokumentiert, dass Sauerstoff aus molekularem Wasser aus der Atmosphäre ins Haar aufgenommen werden kann, was ca. 10-11 % des Gesamtsauerstoffes ausmachen kann. Dieser Effekt ist jedoch glücklicherweise reversibel. Durch ausreichende Vakuumtrocknung vor der massenspektrometrischen Messung kann der nicht-biologische Sauerstoffanteil aus dem Fremdwasser wieder entfernt werden (Bowen et al. 2005). Da die hier untersuchten Proben ausreichend getrocknet wurden, ist davon auszugehen, dass die $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ -Ergebnisse die wirklichen körperinternen Biosyntheseprodukte widerspiegeln, sofern keine irreversiblen Austauschprozesse stattgefunden haben.

Die Borstenproben bestanden aus einer Stichprobe mehrerer Haare, welche den Schweinen zu einem bestimmten Zeitpunkt entnommen wurden. Das daraus resultierende $\delta^{18}\text{O}$ -Ergebnis stellt eine Mischung all dieser Borsten dar und damit einen Mittelwert derjenigen Zeiträume, die von jedem einzelnen Haar repräsentiert werden. Säugerhaare wachsen nicht kontinuierlich, sondern in Phasen. Das bedeutet, dass zu jedem gegebenen Zeitpunkt ein gewisser Anteil der Haare sich entweder in einer Wachstums-, Übergangs- oder Ruhephase befindet (Coplen 1988). Selbst gleich lange Haare können also isotopisch leicht unterschiedliche Zeiträume repräsentieren. Obwohl Haare in verschiedenen Raten wachsen, befindet sich aber die Mehrheit immer in der Wachstumsphase (Tortora & Petti 2002, Rummel et al. 2007). Die exakten Zeiträume, welche von den Haarstichproben abgebildet werden lassen sich in diesem Experiment nicht ermitteln, jedoch sollten sie sich jeweils in einer ähnlichen Größenordnung bewegen. Podlesak et al. (2008) ermittelten in ihrer Fütterungsstudie an Ratten, dass die Bildungszeiten von Haaren und die damit verbundenen Sauerstoffisotope sich in zwei unterschiedliche Aspekte aufgliedern lassen. Ungefähr 83 % des Sauerstoffs im Haar entstammen demnach dem sogenannten „Short Pool“, welcher eine Halbwertszeit von deutlich weniger als 23 Tagen besitzt (genauer konnte die Halbwertszeit im Experiment nicht bestimmt werden). Die übrigen 17 % stammen aus dem „Long Pool“ mit einer deutlich längeren Halbwertszeit von ca. 144 Tagen. Die Verhältnisse und Repräsentationszeiten können bei Schweinen selbstverständlich anders sein, als bei Ratten. Für den Menschen wurde ermittelt, dass sich isotopische Veränderungen nach 14 Tagen erstmals erkennbar in den Haaren manifestieren und sich nach spätestens vier Monaten ein vollständiges Gleichgewicht zwischen den Haaren und der neuen Nahrung eingestellt hat (McCullagh et al. 2005, Rummel et al. 2007). Allgemein spiegeln Haare, je nach Tierart und Haarlänge die letzten

Wochen bis Monate vor der Beprobung wider. In den (adulten) Testindividuen sind es schätzungsweise die vorangegangenen ein bis fünf Monate (Hözl et al. 2004, Rummel et al. 2007, Tütken 2010, Font et al. 2012, Lehn & Graw 2012, Tipple et al. 2013, Lehn & Graw 2014, Chau et al. 2017). Damit zählen die Borsten zu denjenigen Proben, welche die isotopischen Einflüsse einerseits über relativ lange Zeiträume mitteln und außerdem reichen sie unter den organischen Proben in ihrer Repräsentationszeit vergleichsweise weit zurück.

Die $\delta^{18}\text{O}$ -Daten der Schweine und Ferkel streuen zusammen über einen großen Wertebereich von über 6 ‰ mit einer Standardabweichung von 2.40 ‰. Die adulten vier Individuen aus den beiden Schlachtungen variieren deutlich weniger, nämlich um nur knapp über 1 ‰, mit einer Standardabweichung von 0.46 ‰. Auch die Stichprobe der 14 Wochen alten Individuen streut weniger, nämlich um 1.57 ‰ mit einer Standardabweichung von 0.59 ‰. Dies ist vergleichbar mit den Ergebnissen der Studie von Tuross et al. (2008), die unter anderem auch Haare von acht Schweinen untersuchten und eine Standardabweichung von 0.9 ‰ für $\delta^{18}\text{O}$ (Haar) ermittelten. Die in dieser Arbeit errechneten Standardabweichungen sind damit sogar noch deutlich geringer (zumindest wenn man die Altersgruppen getrennt voneinander betrachtet). In einer Studie an einer Gruppe von menschlichen Probanden wurde eine Standardabweichung der inter-individuellen Variation der $\delta^{18}\text{O}$ (Haar)-Werte von ca. 1.5 ‰ ermittelt (Fraser et al. 2006). Auch dieser Wert ist deutlich höher als die hier beobachtete Variation, was aber wahrscheinlich auch daran liegt, dass die Gegebenheiten bei menschlichen Probanden völlig anders sind, als bei in Gefangenschaft gehaltenen Schweinen. Bowen et al. (2009) geben für historische lokale menschliche Populationen eine Standardabweichung von $\delta^{18}\text{O}$ (Haar) von ungefähr 0.6 ‰ an. Dies passt wiederum recht gut zur Verteilung der hier gemessenen Werte (sofern die Ferkel nicht berücksichtigt werden).

Vergleicht man den Wert der ersten Beprobung (im Alter von 3 Wochen) mit dem Mittelwert der adulten Tiere, so ergibt sich eine Differenz von 2.84 ‰. Beim Vergleich des Mittelwertes der 14 Wochen alten Tiere mit dem der adulten ist der Unterschied mit 4.93 ‰ sogar noch viel höher. Das ist insofern bemerkenswert, dass die Tiere im Alter von 14 Wochen bereits seit sechs bis acht Wochen abgestillt waren. Diese Abweichungen zwischen Ferkeln und adulten Tieren und die Verteilung der Werte innerhalb dieser beiden Gruppen müssen diskutiert werden. Die erwachsenen Schweine weisen eindeutig niedrigere Werte auf, als das drei Wochen alte und die 14 Wochen alten Ferkel. Verantwortlich hierfür könnte unter anderem wieder der Stilleffekt sein. Die Tiere waren mit ca. 6-8 Wochen vollständig abgestillt, was bedeutet, dass die 14 Wochen alten Ferkel schon seit einiger Zeit keinerlei Muttermilch mehr konsumierten. Dennoch sind ihre $\delta^{18}\text{O}$ (Haar)-Werte am höchsten, sogar noch höher als der des dreiwöchigen Ferkels. Dies könnte als Hinweis darauf interpretiert werden, dass der Stilleffekt in den Borsten aufgrund des langsamen Wachstums mit einiger Verzögerung auftritt (Reservoir-effekt).

Der Unterschied zwischen dem drei Wochen alten und den 14 Wochen alten Ferkeln kann nicht mit dem verstärkten Konsum von Hochenergiefutter (welches höhere $\delta^{18}\text{O}$ -Werte aufweist als Niedrigenergiefutter) der Ferkel nach dem Abstillen erklärt werden, da die Muttersau in der Stillphase mit einem genauso hohen Anteil an Hochenergiefutter ernährt wurde. Wahrscheinlicher ist es also, dass der Stilleffekt in dem dreiwöchigen Individuum noch nicht vollständig ausgeprägt ist (weil pränatale Isotopen noch eine Rolle in den Borsten spielen) und die Borsten der älteren Ferkel auch Wochen nach dem Abstillen noch einen starken Stilleffekt präservieren.

Allerdings liegen die Sauerstoffisotopenverhältnisse der Ferkelborsten mit über 4.5 ‰ Verschiebung gegenüber den adulten Tieren deutlich höher, als es gängige Literaturangaben zum Stilleffekt eigentlich vermuten lassen würden. Möglicherweise spielt auch der Futterwechsel hin zu mehr Gras und Silage eine Rolle. Jedoch weisen diese sogar geringere $\delta^{18}\text{O}$ -Werte auf, als das Kraftfutter, welches jungen Ferkeln und der Muttersau zur Verfügung stand. Wahrscheinlicher ist es, dass der Wasserhaushalt beim Zustandekommen des $\delta^{18}\text{O}$ (Haar)-Verhältnisses eine Rolle spielt und sich im Verlauf des Heranwachsens verändert. Da $\delta^{18}\text{O}$ (Haar) in den gängigen Modellen über das Darmwasser modelliert wird, welches sich aus Körperwasser und Trinkwasser (plus Nahrungswasser und Futter-O) zusammensetzt, ist der relative Anteil des Trinkwassers eine ausschlaggebende Komponente. Die niedrigeren Werte bei den adulten Tieren wären dann damit zu erklären, dass bei diesen verhältnismäßig mehr Trinkwasser konsumiert wird, oder zumindest das $\delta^{18}\text{O}$ (TW) einen größeren

Einfluss auf $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ hat, als bei den subadulten Tieren. Da das Trinkwasser deutlich geringere $\delta^{18}\text{O}$ -Werte aufweist, als die anderen Quellen (Futter-O , $\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}}$, O_2) könnte es dann zu einer Senkung der Isotopenverhältnisse kommen (Longinelli 1984, Luz et al. 1984, O'Brien & Wooller 2007). Geht man also davon aus, dass das Darmwasser bei den adulten Tieren zu signifikant höheren Anteilen vom Trinkwasser bestimmt wird als bei den jüngeren Tieren (wofür auch die Ergebnisse der Modellschätzungen sprechen), sowie der Tatsache, dass kleinere Tiere eine relativ gesehen höhere Körperoberfläche im Verhältnis zur Körpermasse haben und damit eine stärkere Anreicherung des Körperwassers durch Evaporation zu erwarten ist, so erscheint diese Erklärung als wahrscheinlicher, als dass die vollen 4.93 ‰ Differenz zwischen adulten und 14-wöchigen Tieren alleine auf den Stilleffekt zurückzuführen sind. In Kombination mit dem Stilleffekt könnte die große Differenz zwischen den Altersgruppen erklärt werden. Es ist bekannt, dass sowohl das Trinkwasser, als auch das Futter eine große Rolle beim Zustandekommen von $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ spielt (Ehleringer et al. 2008, Chesson et al. 2010, Kirsanow & Tuross 2011). Wie groß der jeweilige Anteil im konkreten Einzelfall innerhalb einer bestimmten Art jedoch ist, ist schlecht erforscht (Podlesak et al. 2008, Tuross et al. 2008, Bowen et al. 2009, Michal & Schomburg 2012, Welle 2012).

Der geringere Unterschied der adulten Borstenproben zum drei Wochen alten Individuum könnte daher rühren, dass dessen Borsten zum Teil auch noch pränatale Isotopenbedingungen repräsentieren. In der Literatur gibt es bis dato keine dem Autoren bekannte Angaben zum Stilleffekt in keratinösen Geweben. Da die Modelle für $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ sich aber von jenen für $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ unterscheiden da hier das Darmwasser als Ausgangspunkt angesehen wird, kann es durchaus sein, dass der Stilleffekt in Haaren und Borsten deutlich anders ausfällt als in den anderen Körperbestandteilen.

Die adulten vier Individuen lassen sich nicht weiter nach Schlachtzeitpunkt unterscheiden. Das liegt vermutlich daran, dass ein Monat Zeit zwischen den beiden Schlachtungen nicht ausreicht, um Unterschiede abzubilden, weil ein längerer Zeitraum von den Haaren abgebildet wird. Außerdem änderten sich die Bedingungen zwischen den Schlachtungen evtl. nicht ausreichend stark um zu Unterschieden zu führen. Falls die These, dass in adulten Tieren das Trinkwasser eine größere Rolle für den $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ -Wert spielt, korrekt ist, würde auch das zu einer höheren Stabilität der Daten im Erwachsenenalter führen, da die Trinkwasser-Isotopie zeitlich nahezu konstant war.

Laut Chen & Auerswald (2018) und Podlesak et al. (2008) soll die Differenz zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ bzw. $\delta^{18}\text{O}(\text{Körperprotein})$ ungefähr 14 ‰ betragen. In dieser Arbeit liegen die Differenzen für die vier adulten Individuen bei 10.82 bis 12.44 ‰, also deutlich geringer. Wie bereits einleitend erklärt, basieren die meisten Schätzmethoden von $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ aber nicht direkt auf dem Körperwasser, sondern auf dem Darmwasser, welches sich neben Körperwasser auch aus der Nahrungs- und dem Trinkwasser zusammensetzt. Ist der Anteil an Trinkwasser und/oder Futterwasser (welche beide niedrigere Isotopien aufweisen als das Körperwasser) im Darmwasser höher, so sinkt auch der $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ -Wert entsprechend.

a) *Lineare Regression*

Der lineare Ansatz, um $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ mittels einer artspezifischen Regressionsformel über $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ zu berechnen, konnte hier nicht zufriedenstellend getestet werden, da für Schweine keine entsprechenden Gleichungen existieren. Die Anwendung der am Menschen etablierten Gleichungen (nach Ehleringer et al. (2008) bzw. Bowen et al. (2009)) zeigt, dass diese bei der linearen $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ -Modellierung nicht als Modell für Schweine gesehen werden können und zu unbrauchbaren Grenzwerten führen, die sich kaum mit den tatsächlich gemessenen Werten überschneiden (siehe Ergebnisteil ab Seite 159). Im Gegensatz zur linearen Regression von $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ wäre es bei den Borsten theoretisch möglich, die gesamte Spanne der $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ -Proben adulter Tiere (1.07 ‰) mit der

Bandbreite des Trinkwassers (2.48 ‰) zu erklären. Werden hingegen die Proben subadulter Individuen dazu genommen, ist dies definitiv nicht mehr der Fall (Spanne Ferkel und Schweine zusammen: 6.10 ‰). Auch die Ferkelproben alleine streuen weiter, als das Trinkwasser (2.70 ‰) und können somit nicht durch eine einfache lineare Regression beschrieben werden. Als Grund hierfür ist erneut der Stilleffekt in Betracht zu ziehen, der einerseits zu einer hohen Abweichung von den adulten Individuen führt und andererseits zu einer hohen Variabilität innerhalb der Ferkel, abhängig davon wie stark er noch bzw. schon im entsprechenden Alter ausgeprägt ist. Eine eigene Regression konnte deshalb nicht erstellt werden, weil die entsprechenden Vergleichsstudien ihre Regressionsformeln anhand von Datenpunkten verschiedener Standorte generierten. Da für diese Studie lediglich ein Standort untersucht wurde, konnten lediglich existierende Regressionen an den Daten getestet werden.

b) Massebilanz-Modelle

Von allen getesteten Massebilanz-Modellen aus der Literatur sagt keines die $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ -Werte der geschlachteten Schweine korrekt hervor (siehe Ergebnisteil ab Seite 159). Alle davon zeigen hingegen gute Übereinstimmungen mit den $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ -Ergebnissen der Ferkel. Da diese aller Wahrscheinlichkeit nach durch den Stilleffekt erhöht sind, welcher von keinem der Modelle berücksichtigt wird, setzen sämtliche angewandten Modelle zu hoch an. Das gilt sowohl für den Ansatz nach Gretebeck et al. (1997) bzw. Podlesak et al. (2008), als auch für das Modell nach Ehleringer et al. (2008). Um zu vermeiden, dass es bereits bei der Berechnung des Körperwassers zu Unsicherheiten bzw. Abweichungen kommt, die sich dann auf die Vorhersagen von $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ fortpflanzen, wurden für die Modellierung der Borstenproben direkt die gemessenen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Werte verwendet.

Die Verschiebung der Modellgrenzen nach oben, gegenüber den gemessenen Borstenproben kann also demnach nicht an einer vorausgegangenen Fehleinschätzung des Körperwassers liegen.

Beim Gretebeck-Podlesak-Modell ist es interessant zu sehen, dass sich die Modellgrenzen nicht so stark verschieben, wenn alternativ die von Bryant & Froelich (1995) angegebenen Fraktionierungsfaktoren verwendet werden. Offenbar spielen die entsprechenden fraktionierten Flussraten in dem Haar-Modell eine geringere Rolle als beim Körperwasser, wo die Änderung der Fraktionierungsfaktoren das Ergebnis der Modellierung eklatant beeinflusste. Die verschiedenen Versionen des Ehleringer-Modells (nach Ehleringer et al. (2008), Bowen et al. (2009) und O'Grady et al. (2012)) unterscheiden sich lediglich in der Zusammensetzung des Darmwassers. Wie sich zeigt, verschieben sich die Modellgrenzen umso weiter nach oben, je mehr Bedeutung g_1 , also dem Anteil des Körperwassers im Darmwasser beigemessen wird. Den Extremfall stellt die Hypothese von O'Grady et al. (2012) dar, laut derer $\delta^{18}\text{O}(\text{DW})$ ausschließlich von $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ bestimmt wird und diesem gleichzusetzen ist. Diese Hypothese trifft auf die untersuchten Schweine jedoch offenbar nicht zu. Selbst die von Ehleringer et al. (2008) und Bowen et al. (2009) angegebenen Mischanteile von g_1 und g_2 , bei denen das Trink- und Futterwasser eine größere Rolle spielt, berechnen zu hohe Modellgrenzen. Eine nahezu perfekte Vorhersage der $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ -Daten der vier adulten Tiere lässt sich jedoch erreichen, wenn man davon ausgeht, dass $\delta^{18}\text{O}(\text{DW})$ ausschließlich vom Nahrungswasser (also Trink- und Futterwasser) bestimmt wird. Setzt man demnach $g_1 = 0$ und $g_2 = 1$, so liegen die vier Borstenproben-Messwerte der adulten Schweine genau innerhalb des vorhergesagten Bereiches und auch der Mittelwert passt hervorragend zum Mittelwert der Schätzung. Die Ergebnisse der Modellierungen können also demnach so interpretiert werden, dass Schweine bei der Zusammensetzung ihres Darmwassers und infolgedessen bei der Isotopie ihrer Borsten sehr stark vom Trink- bzw. Nahrungswasser bestimmt sind und kaum von der Isotopie des Körperwassers. Tatsächlich sind Schweine obligate Trinker mit vergleichsweise hohem Trinkwasserverbrauch, was diese These

stützt (Yang et al. 1981, Gill 1989, Mroz et al. 1995, Weber 2012). Menschen und andere Primaten haben hingegen vermutlich eine geringere Trinkrate und eine höhere Sekretion von Körperwasser in Magen und Darm. Interpretiert man die Daten in dieser Weise, so erklärt sich auch, warum die anderen Modelle (und Modellversionen) besser zu den Daten der Ferkel zu passen scheinen: Diese sind mehr oder weniger stark vom Stilleffekt betroffen, was bedeutet, dass das aufgenommene Trink- und Nahrungswasser bereits dem Körperwasser der Muttersau entspricht. Dadurch steigt der Einfluss von $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ in Form der aufgenommenen Milch natürlich und die Modelle, welche dem eigenen Körperwasser eine höhere Bedeutung zuordnen, passen besser, auch wenn es eigentlich nicht daran liegt, dass der Anteil von g_1 steigt. Stattdessen entspricht g_2 vielmehr isotopisch dem, was die Modelle für g_1 erwarten würden und so kommt es dazu, dass die Modelle besser zu den Ferkelproben passen, als zu den adulten Schweinen. Zusätzlich zum Stilleffekt kann es außerdem sein, dass bei jüngeren Individuen mit geringerer Körpergröße das Trinkwasser proportional eine geringere Rolle spielt und dadurch das Körperwasser einen höheren Anteil hat. Allgemein gilt nämlich, dass die Trinkrate bei größeren Tieren relativ gesehen höher ist und es ist auch erwiesen, dass sich das Trinkverhalten von Schweinen im Verlauf der Lebenszeit dramatisch verändert (Schoeller 1988, Gill 1989, Brooks & Carpenter 1990, Bryant & Froelich 1995, Kohn 1996).

Im Gretebeck-Podlesak-Modell gibt es zwar die Größen g_1 und g_2 nicht, jedoch wird auch hier das Darmwasser so modelliert, dass dem Körperwasser eine hohe Bedeutung beigemessen wird. Im Prinzip wird das Darmwasser entsprechend dem Körperwasser modelliert, nur das $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ durch $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ ersetzt wird. Also trifft die oben genannte Erklärung dafür, warum die Modellgrenzen besser zu den Ferkeln, als zu den adulten Schweinen passen, sich auch auf dieses Modell übertragen. Ein erhöhter fraktionierter Wasserdampfverlust kann nicht als Ursache herangezogen werden wie beim Körperwasser, da einerseits diese Größe nicht in den Modellen vorkommt und andererseits ja die gemessenen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Werte verwendet wurden, die entsprechend bereits durch Evaporation angereichert sind.

Der Fraktionierungsfaktor zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{DW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ von $\alpha_0 = 1.0164$ nach Kreuzer-Martin et al. (2003) wurde vielfach bestätigt und kann wohl auch in dieser Studie zumindest nicht grundlegend in Frage gestellt werden. Abweichungen zwischen Schätz- und Messwerten sind wahrscheinlicher über die Zusammensetzung des Darmwassers zu erklären, als über den Fraktionierungsfaktor. Alternativ wurden die Modelle auch mit einem Fraktionierungsfaktor von $\alpha_0 = 1.027$ (nach Sternberg (1989)) durchgeführt, was aber zu völlig unplausiblen Ergebnissen führte und eher für den Wert von Kreuzer-Martin et al. (2003) spricht.

Schlussfolgernd kann also gesagt werden, dass vieles dafür spricht, dass das Darmwasser von Schweinen fast ausschließlich vom Trink- und Futterwasser aber nicht vom Körperwasser bestimmt ist. In diesem Fall wäre das insofern als positiv zu bewerten, dass die Beziehung zwischen Haaren bzw. Borsten und dem Trinkwasser bei Schweinen deutlich direkter sein könnte als für andere Tiere angenommen. Dies würde es leichter machen in entsprechenden Fragestellungen zu validen Grenzwerten zu kommen. Nichtsdestotrotz sind weitere Studien zu Schweineborsten und deren $\delta^{18}\text{O}$ -Zusammensetzung nötig, um diese Hypothesen zu untermauern und die Zusammensetzung des Darmwassers bzw. von $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ zu quantifizieren.

3. Phosphat

Die $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Daten der Knochen- und Zahnschmelzproben repräsentieren gewissermaßen die am weitesten zurückliegenden Isotopenverhältnisse aller Schweineproben. Bei den Knochen liegt das an den vergleichsweise geringen Turnover-Raten des Apatits und die Zähne sind nach ihrer Mineralisation in der Bildung abgeschlossen und speichern somit nur einen bestimmten festgelegten Zeitraum (Grupe 1998, Martin et al. 1998, Wright & Schwarcz 1998, Phillips & Eldridge 2006, Lehn & Graw 2014, Pederzani & Britton 2018). Die langsame Umwandlung des Knochenminerals hat aber auch zur Folge, dass der entsprechende $\delta^{18}\text{O}$ -Wert eine Mischung aller Einflüsse über eine relativ lange Zeit mittelt, wodurch kurzfristige Schwankungen evtl. nicht mehr sichtbar sind (Libby et al. 1964, Copley et al. 2004, Tütken 2010, Pederzani & Britton 2018). Trotzdem führen unterschiedliche Umbauraten in verschiedenen Knochentypen dazu, dass diese unterschiedliche Zeiträume abbilden (Rummel et al. 2007, Meier-Augenstein & Fraser 2008, Tütken 2010). Denkbar ist auch eine Abhängigkeit der $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Verhältnisse von der Entfernung des jeweiligen Knochentyps vom Körperkern. Eine solche konnte jedoch statistisch nicht nachgewiesen werden und es zeigten sich in den untersuchten Proben auch keine entsprechenden Trends.

Es konnten eindeutige Unterschiede zwischen den Phosphatproben nachgewiesen werden. Bei den Zähnen bestehen diese Unterschiede zwischen den jeweiligen Zahntypen. Während Milchzähne und dritte Molare isotopisch ununterscheidbar sind, weichen die ersten Molare eindeutig nach oben hin ab. Um dies korrekt zu interpretieren, müssen die jeweiligen zahnspezifischen Mineralisationszeiträume berücksichtigt werden (Tütken 2010). Bei Schweinen findet die Mineralisation der Milchzähne vollständig während der Trächtigkeit und somit vor der Geburt statt, die ersten Molaren mineralisieren zwischen dem zweiten und dritten Monat nach der Geburt und die dritten Molaren zwischen dem dritten und dreizehnten Lebensmonat (Habermehl 1961, Silver 1969, Tonge & McCance 1973, Hillson 1986, Rolett & Chiu 1994, Wittemann 2004, Hillson 2005, Lee-Thorp 2008, Tucker & Widowski 2009). Folglich bildet jeder Zahntyp einen eigenen Lebensabschnitt der Testindividuen ab und diese entsprechenden Repräsentationszeiten überschneiden sich nicht. Die Milchzähne spiegeln somit die isotopischen Bedingungen in utero wider, während der Mineralisationszeitraum der M1-Molaren vollständig in die Stillphase fällt und die M3-Molaren wiederum fast über den gesamten darauf folgenden Zeitraum (welcher zum allergrößten Teil nach dem Abstillen stattfand) bis hin zur Schlachtung im Alter von 13 bzw. 14 Monaten mineralisieren. Die Erklärung für die erhöhten $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Werte in den ersten Molaren ist also sehr wahrscheinlich im Stilleffekt zu suchen. Die Milchzähne entsprechen den isotopischen Einflüssen der Muttersau und die dritten Molaren den Einflüssen der heranwachsenden, abgestillten Schweine. Bei beiden ist demnach kein Stilleffekt zu erwarten. In den ersten Molaren hingegen ist ein maximal ausgeprägter Stilleffekt zu erwarten, da die Schweine im Alter der Mineralisation ausschließlich Muttermilch konsumierten. Die Ähnlichkeit der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von Milchzähnen und dritten Molaren deutet darauf hin, dass die entsprechenden isotoopenrelevanten Bedingungen bei der Muttersau ähnlich waren, wie bei den heranwachsenden Schweinen im Zeitraum der Mineralisation der M3. Dies wiederum spricht dafür, dass die gemessenen Isotopenverhältnisse in den dritten Molaren vor allem spätere Lebensabschnitte widerspiegeln, in denen die Testschweine bezüglich Gewicht und Physiologie bereits stark der Mutter ähnelten.

Der Stilleffekt spielt offenbar auch für die Verteilung der übrigen Phosphat-Daten eine Rolle. So lassen sich alle Proben, die (zumindest teilweise) über die Stillphase hinweg integrieren, von jenen

unterscheiden, die (größtenteils) außerhalb davon gebildet wurden. Was die Knochenproben angeht, sollten jene von Individuum 2 am stärksten vom Stilleffekt betroffen sein, weil dieses im Alter von drei Wochen bereits ausreichend Zeit hatte, signifikante Mengen angereicherter Muttermilch zu konsumieren (was für Individuum 1 im Alter von einer Woche und gesundheitsbedingt verminderter Nahrungsaufnahme nicht gilt). Tatsächlich sind die $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Werte von Femur und Mandibel bei Individuum 2 sichtbar erhöht. Die Anreicherung ist im Femur noch einmal deutlich höher, als in der Mandibel und interessanterweise in der Pars petrosa überhaupt nicht festzustellen. Jedoch ist der entsprechende Wert von Individuum 1 deutlich niedriger als die übrigen, wodurch auch hier Ferkel 2 einen deutlich höheren Wert aufweist als Ferkel 1. Gegenüber den $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Werten der adulten Pars petrosa Proben ist der von Individuum 2 aber nicht erhöht. Die Erklärung hierfür liegt vermutlich wiederum in den Turnover-, oder aber auch Wachstums-Raten der jeweiligen Knochentypen. Denn nicht nur die Umwandlung und Ersetzung von Knochengewebe variiert im Schwein je nach Skelettelement, sondern im Laufe des Heranwachstums unterliegt der Körper (und damit auch das Skelett) einem allometrischen Wachstum, bei dem bestimmte Knochen relativ gesehen schneller wachsen als andere (Walstra 1980, Davies et al. 1984, Whittemore 1986, Weiler 2005). Dass sich Knochen in ihren jeweiligen isotopischen Repräsentationszeiten je nach Typ unterscheiden ist bereits gut bekannt (Hölzl et al. 2004, Tütken 2010, Lehn & Graw 2012, Lehn & Graw 2014). Laut Tütken (2010) gilt für den Menschen, dass Schädelknochen sich deutlich langsamer verändern, als die Knochen des Postcraniums. Besonders langsam verändert sich das Felsenbein (Pars petrosa). Vergleichbares ist für Schweine zu erwarten. Der direkte Bereich der Hörschnecke verändert sich nach seiner Bildung sogar so gut wie gar nicht mehr. Hier wurden allerdings Bereiche der Pars petrosa beprobt, in welchen Turnoverprozesse stattfinden, wenn auch sehr langsame.

Die $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Daten der Knochen können also folgendermaßen erklärt werden: Das Femur unterliegt vergleichsweise schnellem Turnover (und in so jungem Alter vor allem starkem Wachstum) und zeigt in Individuum 2 im Alter von drei Wochen schon den größten Einfluss des Stilleffekts, während die Mandibel sich langsamer umwandelt (bzw. allometrisch langsamer wächst) und demnach noch mehr Sauerstoffatome aus der Zeit vor der Geburt enthält. Die Pars petrosa verändert sich sogar so langsam, dass scheinbar noch gar kein Stilleffekt bei Ferkel 2 zu erkennen ist. Die höchsten $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Verhältnisse in den Felsenbeinen liegen bei den Individuen der ersten Schlachtung vor, was ebenfalls für eine verspätete Reaktion auf den Stilleffekt bzw. eine langsame Veränderung nach dem Abstillen spricht, oder aber noch den Einfluss der hochenergiefutterreichen Ernährung (mit höheren Isotopen) im Vergleich zur späteren restriktiven Ernährung (mit niedrigeren Isotopen) erkennen lässt.

Dadurch lässt sich möglicherweise auch erklären, warum die Knochenproben der beiden Schlachtungen sich signifikant voneinander unterscheiden. Offenbar ist der Monat zwischen den beiden Schlachttagen eine ausreichend große Zeitspanne, um selbst im Knochenmineral zu erkennbaren Veränderungen zu führen. Da das Trinkwasser weitestgehend konstant war, sind mögliche verantwortliche Faktoren der bereits erwähnte Futterwechsel hin zu mehr Gras und Silage im Alter von ca. 12-14 Wochen, aber auch innere Faktoren die zu einer veränderten Fraktionierung der Outputs und des Körperwassers geführt haben (z.B. verstärkter transpirativer Wasserverlust). Dass bereits innerhalb eines Monats solche signifikanten Veränderungen im Bioapatit stattfinden können, überrascht angesichts der vergleichsweise langen Zeiträume, über die Knochengewebe isotopisch integriert. Möglicherweise hat es auch damit zu tun, dass die geschlachteten Schweine noch nicht vollständig ausgewachsen waren und somit nicht nur der durch Turnover ersetzte Sauerstoff eine Rolle spielt, sondern auch der Netto-Zuwachs im Zuge des Körperwachstums (Bryant & Froelich 1995, Phillips & Eldridge 2006). Die Veränderlichkeit der Knochenproben im Gegensatz zu den

Zahnschmelzproben und der Wechsel in der Fütterung sind wahrscheinlich auch dafür verantwortlich, dass sich Knochen und Zähne auch abgesehen vom Stilleffekt signifikant unterscheiden. So sind Knochen- und Zahnschmelzproben, die jeweils beide dem Stilleffekt unterliegen sollten, trotzdem voneinander verschieden.

Auch Knochen- und Zahnproben, die jeweils nicht (oder kaum) vom Stilleffekt betroffen sind, lassen sich eindeutig unterscheiden. Das hat vermutlich damit zu tun, dass der Knochen über einen längeren Zeitraum hin integriert und außerdem kontinuierlich wächst und ersetzt wird, wohingegen der Zahnschmelz in seinem Wachstum zeitlich und räumlich eindeutig begrenzt ist. Im Knochen spielen außerdem Faktoren eine Rolle, wie Futterwechsel und sonstige Veränderungen, die im in seiner Bildung bereits abgeschlossenen Zahnschmelz nicht mehr zu Veränderungen führen können. Allerdings kann dies nicht die Erklärung im Falle der M3-Zahnproben sein, das hier die Mineralisationszeit sich ebenfalls fast über den gesamten Zeitraum zwischen Abstillen und Beprobung erstreckt. Der Unterschied zum Knochen besteht hier darin, dass dieser nicht nur neuen Sauerstoff durch Wachstum und Turnover hinzufügt, sondern durch den Turnover auch alter Sauerstoff aus dem Mineral gelöst wird, wodurch die älteren isotopischen Informationen kontinuierlich abgeschwächt werden (Rummel et al. 2007, Tütken 2010). Im Gegensatz dazu verbleibt Sauerstoff, der einmal in den Zahnschmelzapatit eingebaut wurde, dort bis zum Abschluss der Mineralisation, wodurch frühere Zeiträume hier relativ gesehen stärker ins Gewicht fallen könnten (Smith 1998, Humphrey et al. 2008).

Während die Zahnproben sich aufgrund ihrer festgelegten Mineralisationszeiten nach Typen statistisch unterscheiden lassen (zumindest M1 von M3 und Milchzähnen), ist dies für die Knochen aufgrund des kontinuierlichen Wachstums und Turnovers nicht der Fall. Hier müssen die Turnover-Zeiten und Wachstumsraten des jeweiligen Knochentyps in Verbindung mit dem jeweiligen Beprobungszeitpunkt betrachtet werden. Die Daten sprechen aufgrund der Tatsache, dass die einzelnen Knochentypen der adulten Individuen sich statistisch nicht unterscheiden dafür, dass es abgesehen von der Repräsentationszeit keine vom Typ des Knochens abhängigen Unterschiede beim Zustandekommen des $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Verhältnisses gibt. Unter gleichbleibenden äußeren Faktoren, konstanten In- und Outputs und konstanter Körpergröße, sollten nach einer ausreichenden Angleichungszeit (je nach Knochentyp) alle Knochen eines Individuums sich sauerstoffisotopisch einander angleichen.

Was die Verteilung der $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Daten angeht, so existieren Richtwerte aus der Literatur, welche Grenzwertbereiche für historische, archäologische oder rezente Populationen als lokale Spanne zu erwarten sind. Die minimal zu erwartende Streuung örtlicher Sauerstoffisotopenwerte einer Art an einem bestimmten Fundort wird, je nach Quelle, mit ca. 1 bis 2.5 ‰ angegeben (Longinelli 1984, White et al. 1998, White et al. 2000, Prowse et al. 2007, Daux et al. 2008, Grupe et al. 2015). d'Angela & Longinelli (1990) geben für domestizierte Nutztiere eine Bandbreite von 2.4 ‰ an. Diese Angaben stellen selbstverständlich nur einen groben Vergleichsrahmen dar, von Ort zu Ort können das Angebot an Nahrungs- und Wasserquellen, die klimatischen und saisonalen Schwankungen und die Variabilität im Verhalten der Individuen auch zu größeren Schwankungen führen. Einen deutlich höheren Grenzwertbereich der intraspezifischen isotopischen Variation von bis zu 5 ‰ ermittelten Sponheimer & Lee-Thorp (1999), jedoch nicht für $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$, sondern für $\delta^{18}\text{O}(\text{CO}_3^{2-})$. Alle hier gemessenen Phosphatproben zusammen verteilen sich über eine Spanne von 4.52 ‰. Damit streuen sie beinahe doppelt so stark, wie es beispielsweise der Literaturwert für domestizierte Nutztiere von d'Angela & Longinelli (1990) erwarten lässt.

Allerdings umfassen die hier untersuchten Phosphatproben sowohl Zähne, als auch Knochen von Individuen unterschiedlicher Altersklassen und sind zum Teil stark vom Stilleffekt betroffen. Betrachtet

man beispielsweise nur die Zähne, deren Mineralisationszeiten nicht in die Stillphase fallen (Milchzähne und M3), so streuen diese nur über 0.91 ‰. Alle Knochenproben der adulten vier Individuen streuen über nur 0.89 ‰ und selbst wenn alle Proben (also Zähne und Knochen), die nicht (oder kaum) vom Stilleffekt betroffen sein sollten, zusammengekommen werden, streuen sie über weniger als 2 ‰. Es sind also die Proben der Ferkel, welche dazu führen, dass die von der Literatur angegebenen Richtwerte von der Gesamtheit der Phosphatdaten so stark überschritten werden. Das liegt wahrscheinlich zum einen am Stilleffekt, der jedoch eigentlich in der Literatur auch berücksichtigt sein sollte. Hinzu kommt, dass junge Ferkel deutlich andere physiologische Eigenschaften besitzen, als adulte Schweine. Ferkel 1 wog zum Zeitpunkt des Todes nur etwa 1000 g, Ferkel 2 nur etwa 4 kg, verglichen mit ungefähr 100 kg bei den vier adulten Tieren. Die Körpermasse veränderte sich zwischen Ferkeln und Schweinen also um den Faktor 100 bzw. 25. Dieser gravierende Masseunterschied hat, neben der Tatsache, dass vor allem Ferkel 2 signifikant von der Isotopie der Muttermilch beeinflusst ist, höchstwahrscheinlich einen signifikanten Einfluss auf die Körperzusammensetzung und die stabilen Sauerstoffisotopenverhältnisse. Für Unterschiede im $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ (bzw. $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$) zwischen verschiedenen lokalen Tierarten wird als Ursache vor allem die unterschiedliche Körpergröße, unterschiedliche physiologische Anpassungen bzw. Unterschiede im Verhalten, sowie unterschiedliche Trinkwasserquellen angegeben (Kohn 1996, Kohn et al. 1996, Grupe et al. 2015, Green et al. 2018). Dadurch kann es laut Kohn (1996) an ein und demselben Ort zu Unterschieden von 5-10 ‰ zwischen verschiedenen Arten kommen.

Ferkel und Schweine sind ebenfalls bezüglich Körpermasse und Physiologie eklatant verschieden. Die Unterschiede in der Körpermasse sind bei Schweinen, welche bei der Geburt ein sehr niedriges Gewicht aufweisen und dann sehr schnell wachsen, besonders stark ausgeprägt (Weiler 2005). Dies hat natürlich auch Einfluss auf physiologische Faktoren, wie Transpirationsrate, Wärmehaushalt, Fressverhalten etc. Auch die Auf- und Umbauraten von Knochengewebe sind in jungem Alter deutlich höher als im Erwachsenenalter (Lehn & Graw 2014). Zusätzlich zum Stilleffekt könnte dies also durchaus zu Unterschieden zwischen Ferkeln und Schweinen führen. Für Ratten wurde bereits nachgewiesen, dass die Ontogenie für die jeweiligen $\delta^{18}\text{O}$ -verhältnisse eine Rolle spielt (Kirsanow & Tuross 2011). Allerdings muss unter dieser Prämisse die Frage gestellt werden, warum sich dann Milchzähne und M3-Molaren nicht voneinander unterscheiden lassen. Der Grund hierfür liegt in der Tatsache, dass die Milchzähne in utero mineralisieren, was bedeutet, dass sie isotopisch als Körperbestandteil der Muttersau betrachtet werden müssen und somit innerhalb eines adulten, ausgewachsenen Körpers gebildet werden, genauso wie später der Zahnschmelz von M3 bis ins Schlachtalter hinein mineralisiert.

Nach der Geburt spielen dann der Input an Muttermilch und atmosphärischem Sauerstoff, sowie evaporative Fraktionierung eine Rolle. Hierbei ist es allerdings schwierig, Stilleffekt und sonstige Effekte zu unterscheiden, da der Stilleffekt letztlich nichts weiter ist, als die Summe aus bereits angereicherter Muttermilch und den im Körper des Ferkels stattfindenden Fraktionierungsvorgängen. Letztendlich ist natürlich auch nicht auszuschließen, dass die Richtwerte sich nicht mit einem Schweinehaltungsbetrieb vergleichen lassen, wie er hier untersucht wurde. Möglicherweise ist das Spektrum der zur Verfügung stehenden Futterquellen höher, als es in den entsprechenden Studien gewesen ist. Dagegen spricht, dass alle Schweine mit regionalen Futtermitteln ernährt wurden, nur eine isotopisch nahezu konstante Wasserquelle nutzten und auch ansonsten unter nahezu identischen Bedingungen gehalten wurden. Außerdem wurde auch der Richtwert von 1 ‰ von Longinelli (1984) für rezente Individuen ermittelt. In diesem Fall handelt es sich sogar um einen Wert für menschliche Proben, die in der Regel ein noch weiteres isotopisches Spektrum erwarten lassen würden als Nutztiere. Leider wurden in der Fütterungsstudie an rezenten Hausschweinen von Tuross et al. (2008) keine Phosphat- oder Karbonat-Proben untersucht, diese hätten einen optimalen Vergleich mit den hier erhobenen Daten ermöglicht.

Betrachtet man die hier untersuchten mineralisierten Hartgewebe, so kann man bezüglich des Stilleffektes einerseits zwischen Zahnschmelz und Knochen und darüber hinaus noch zwischen den einzelnen Zahn- bzw. Knochentypen unterscheiden. Im Knochen kann man einerseits Ferkel 1 und Ferkel 2 miteinander vergleichen und andererseits die beiden Ferkel mit den adulten vier Individuen. Wie bereits erwähnt, stellen die Knochen der beiden Ferkel zwei unterschiedliche Mischverhältnisse aus pränatalem und postnatalem Knochenzuwachs dar, und damit ist auch der Stilleffekt (welcher nur die postnatalen Anteile betrifft) jeweils unterschiedlich stark ausgeprägt. Im drei Wochen alten Ferkel 2 sind somit erwartungsgemäß höhere $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Werte vorzufinden, weil es bereits länger Muttermilch konsumiert hatte, als das eine Woche alte Ferkel 1, welches kaum Muttermilch zu sich nahm und nach der Geburt auch kaum wuchs bevor es starb. Im Mittel ist $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ in den Knochen von Ferkel 2 tatsächlich um 0.95 ‰ höher, als in den Knochen von Ferkel 1 (Standardabweichung 0.29 ‰). Dabei unterscheiden sich die Femora mit 1.19 ‰ am stärksten, gefolgt von den Mandibulae mit 1.04 ‰ und der Unterschied zwischen den Partes petrosae ist mit nur 0.63 ‰ am geringsten.

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Knochentypen sind hier zwar noch relativ gering, jedoch zeigt sich bereits in den Ferkeln, dass der Stilleffekt je nachdem, wie schnell ein Knochen wächst, bzw. wie hoch seine Turnover-Rate ist, selbst innerhalb von nur zwei Wochen zu verschiedenen starken Anreicherungen in den beiden Individuen führen kann. Dieser Trend wird noch deutlicher, wenn man die adulten Tiere mit den beiden Ferkeln vergleicht. Ihre Knochen sollten nahezu ausschließlich von Isotopenverhältnissen nach dem Abstillen geprägt sein, allein schon aufgrund des immensen Körper- bzw. Knochenwachstums, das zwischen Abstillen und Schlachtung stattfindet. Selbst ohne jeglichen Turnover würde im adulten Schwein (mit ca. 100 kg Körpermasse) der Anteil des Knochengewebes, welches bis zum Alter des Abstillens gebildet wurde, nur etwa 5 % ausmachen, da die Tiere zum Zeitpunkt des Abstillens in etwa 5 kg wogen (abhängig vom allometrischen Wachstum des Skeletts und einzelner Knochentypen, welches sich aber grob in ähnlichen Dimensionen bewegt wie das Gesamtkörperwachstum) (Walstra 1980). Der Unterschied zwischen den $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Werten von Ferkel 2 (in dem der Stilleffekt maximal ausgeprägt sein sollte) und den adulten Tieren sollte also die größtmögliche stilleffektbedingte Anreicherung aufweisen. Allerdings können die adulten Knochenproben zusätzlich auch noch durch eine höhere Anzahl weiterer Faktoren beeinflusst worden sein, da sehr viel mehr Zeit zwischen dem Tod von Ferkel 2 und den beiden Schlachtungen lag, als zwischen dem Tod von Ferkel 1 und Ferkel 2. Damit können beispielsweise Faktoren wie der Wechsel hin zu mehr Niedrigenergiefutter (Gras und Silage), jahreszeitliche Schwankungen, sowie die offenkundigen Unterschiede in der Körpermasse zu einer Verfälschung des reinen Stilleffektes führen.

Wie im Ergebnisteil dargestellt, besteht kein signifikanter Unterschied zwischen den Knochen-Isotopenverhältnisse der adulten Schweine und jenen von Ferkel 1, wohl aber ein hochsignifikanter Unterschied zwischen den adulten Knochen und den Knochen von Ferkel 2. Tatsächlich übersteigen die Differenzen zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ des einwöchigen Individuums und $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ der adulten Tiere bei Femur und Mandibel nie 0.52 ‰ und liegen zum größten Teil sogar deutlich darunter. Bei der Pars petrosa hingegen zeigen sich deutlichere Differenzen von bis zu 0.91 ‰ zwischen Ferkel 1 und Individuum 3 aus der ersten Schlachtung. Beim Vergleich der adulten Schweine mit dem älteren Ferkel 2 verhält es sich genau umgekehrt: Hier liegen die $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Werte von Femur und Mandibel der ausgewachsenen Individuen deutlich unterhalb denen von Ferkel 2 (Femur: 1.12 bis 1.92 ‰, Mandibel: 0.64 bis 1.13 ‰), die der Pars petrosa jedoch sind sogar um bis zu 0.27 ‰ gegenüber Ferkel 2 erhöht.

In **Tabelle 53** und **Tabelle 54** sind alle Differenzen zwischen den Knochen der Individuen nach Knochentyp angegeben, in **Abbildung 53** lässt sich der zeitliche Verlauf nachvollziehen. Auch hier ist deutlich zu erkennen, wie Femur und Mandibel sich ähnlich verhalten und für Individuum 2 deutlich nach oben hin abweichen, während die Pars petrosa mit einem geringeren Ausgangswert startet und seine höchsten $\delta^{18}\text{O}$ -Werte erst in den adulten Tieren erreicht. Die wahrscheinlichste Erklärung hierfür

sind Unterschiede in der allometrischen Wachstums- und der Turnover-Rate bei der Pars petrosa im Vergleich zu den beiden anderen Knochen. Der Schädel ist bei Schweinen (wie auch bei den meisten anderen Säugetieren) ein Körperteil, der (relativ zu den anderen Körperbestandteilen) bis zur Geburt eine überdurchschnittlich hohe Masse erreicht und anschließend mit deutlich geringerer Rate weiter wächst. So macht der Kopf bei der Geburt 18 % des Gesamtgewichtes aus, während dieser Anteil beim adulten Tier nur noch ca. 4-4.5 % beträgt (Walstra 1980). Das von den Schädelknochen umgebene Gehirn besitzt bei der Geburt bereits 38 % des maturen Endgewichtes, während die Gesamtkörpermasse bei der Geburt erst 0.5 % dieses Endgewichtes erreicht hat (Weiler 2005). Die Kopfpartei besitzt also einen negativen Allometriekoeffizienten, was bedeutet, dass diese Körperpartie sich, relativ gesehen zum Gesamtwachstum, früher entwickelt (Hammond 1932, Swatland 1994).

Für das Felsenbein sollte dieser Trend besonders ausgeprägt sein, da es das Innenohr beherbergt und somit bereits bei der Geburt gewissen anatomischen Ansprüchen genügen muss, um eine funktionierende Sinneswahrnehmung zu ermöglichen. Tatsächlich findet beim Menschen nahezu die gesamte Verknöcherung der Partes petrosae vor der Geburt statt, für andere Großsäuger, einschließlich Schweinen, ist zumindest ein ähnlicher Trend zu erwarten (Smith et al. 2013, Cunningham et al. 2016). Langknochen verhalten sich ontogenetisch genau umgekehrt: sie sind bei der Geburt noch vergleichsweise schwach ausgeprägt und wachsen dann rapide mit der steigenden Bedeutung des Lokomotionsapparates (Walstra 1980, Weiler 2005). Auch die Mandibula verändert sich nach der Geburt noch relativ stark, da die Kiefer während der Stillphase noch nicht zum Kauen benötigt werden (Herring 1985, Swatland 1994). Unter der Hypothese, dass das Felsenbein sich nach der Geburt langsamer verändert als Femur und Mandibel, würde das bedeuten, dass in Ferkel 1 noch weniger Stilleffekt vorhanden ist als in den anderen beiden Knochen, wodurch hier auch die $\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnisse noch geringer sind, weil sie vorrangig durch pränatale Einflüsse geprägt sind.

In Ferkel 2 ist noch nicht das volle Ausmaß des Stilleffektes erreicht wie bei den beiden anderen Knochentypen, weil die Pars petrosa langsamer auf den Einfluss der Muttermilch reagiert. Bei den adulten Tieren scheinen dann noch signifikante Reste des Stilleffektes vorhanden zu sein, die sich selbst ein Jahr nach dem Abstillen noch stärker bemerkbar machen, als in Ferkel 2. Möglich ist aber auch, dass bei den adulten Tieren zusätzlich noch höhere Werte im Felsenbein auftreten, weil sich hier noch stärker der Einfluss der isotopisch angereicherten Hochenergiefütterernährung niederschlägt. Es lässt sich dabei nicht eindeutig feststellen, in welchem Ausmaß der Stilleffekt und die Hochenergiefutter-Phase jeweils zu den erhöhten Isotopenverhältnissen in der Pars petrosa beitragen, fest steht jedoch, dass diese älteren Einflüsse dort noch stärker präsent sind, als in den anderen Knochentypen.

Tabelle 53 $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Ergebnisse der einzelnen Knochentypen nach Individuum und Differenzen zwischen den beiden Ferkeln. Angaben in ‰.

Ferkel 1 vs. Ferkel 2					
	Ferkel 1	Ferkel 2	Differenz	MW Differenz	STABW Differenz
Femur	13.32	14.52	1.19	0.95	0.2889815
Pars Petrosa	12.20	12.83	0.63		
Mandibel	13.00	14.04	1.04		

Tabelle 54 $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Ergebnisse der einzelnen Knochentypen nach Individuum und Differenzen zwischen Ferkeln und adulten Schweinen. Angaben in ‰.

Ferkel 2 vs. Adulte Schweine													
	Ferkel 2	Ind 3	Differenz zu 2	Ind 4	Differenz zu 2	Ind 5	Differenz zu 2	Ind 6	Differenz zu 2	1. Schlachtung (MW)	Differenz zu 2	2. Schlachtung (MW)	Differenz zu 2
Femur	14.52	13.40	1.12	12.80	1.72	12.6	1.92	12.9	1.62	13.10	1.42	12.75	1.77
Pars Petrosum	12.83	13.11	-0.27	12.99	-0.16	12.97	-0.14	12.7	0.13	13.05	-0.22	12.84	0.00
Mandibel	14.04	13.05	0.98	13.09	0.95	12.90	1.13	13.4	0.64	13.07	0.96	13.15	0.88
Ferkel 1 vs. Adulte Schweine													
	Ferkel 1	Ind 3	Differenz zu 1	Ind 4	Differenz zu 1	Ind 5	Differenz zu 1	Ind 6	Differenz zu 1	1. Schlachtung (MW)	Differenz zu 1	2. Schlachtung (MW)	Differenz zu 1
Femur	13.32	13.40	-0.08	12.80	0.52	12.6	0.72	12.9	0.42	13.10	0.22	12.75	0.57
Pars Petrosum	12.20	13.11	-0.91	12.99	-0.79	12.97	-0.77	12.7	-0.50	13.05	-0.85	12.84	-0.64
Mandibel	13.00	13.05	-0.05	13.09	-0.09	12.90	0.10	13.4	-0.40	13.07	-0.07	13.15	-0.15

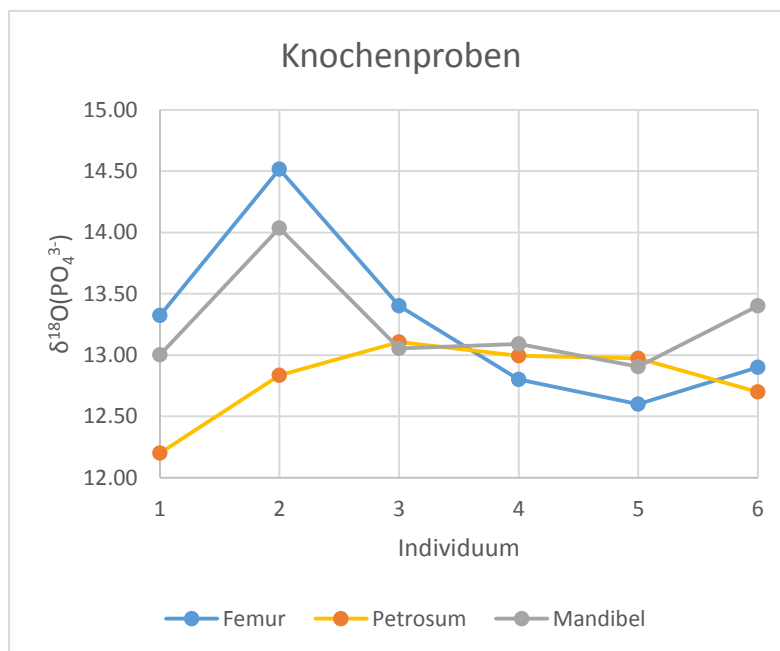


Abbildung 53 $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Verhältnisse nach Knochentyp und Individuum. Während sich Mandibula und Femur ähnlich verhalten und bei Individuum 2 einen eindeutigen Anstieg der Isotopenverhältnisse aufweisen, folgt die Pars petrosa eindeutig nicht diesem Muster, sondern zeigt seine höchsten Werte erst bei den adulten Tieren.

Betrachtet man nun die untersuchten Zahnschmelzproben, so ist eindeutig zu erkennen, dass der Stilleffekt sich am deutlichsten in den ersten Molaren des Dauergebisses zeigt. Dies ist, wie bereits erwähnt angesichts der Mineralisationszeit nicht verwunderlich, da diese Zähne nahezu vollständig während der Stillphase mineralisieren. Die Milchzähne hingegen bilden sich bereits in utero und sollten demnach keinerlei Stilleffekt aufweisen. Die dritten Molaren des Dauergebisses mineralisieren über einen langen Zeitraum, der vorwiegend nach dem Abstillen stattfindet. Da die Mineralisation der M3 (nahezu) bis zu den Schlachtungen reicht, erstreckt sich ihre potentielle Repräsentationszeit über einen

relativ langen Lebensabschnitt, wodurch auch zusätzliche Faktoren, wie Futter- oder Klimawechsel bzw. Körpergrößenänderungen eine Rolle beim Zustandekommen ihrer $\delta^{18}\text{O}$ -Werte gespielt haben können. Den reinsten Stilleffekt sollte man also zwischen den Milchzähnen und den ersten Dauermolaren messen können, da diese kurz nacheinander (und damit unter ähnlichen Futter- und Außenbedingungen) und trotzdem ohne zeitliche Überschneidung mineralisieren. Da sich Milchzähne und dritte Molare statistisch nicht unterscheiden lassen, ist es jedoch möglich, dass keine signifikanten Unterschiede neben dem Stilleffekt bestehen. Möglicherweise repräsentieren die M3 größtenteils den

Lebensabschnitt, in dem die Ferkel noch genauso mit hohem Hochenergiefutteranteil ernährt wurden, wie ihre Mutter.

Die mittlere Differenz zwischen Milchzähnen (nur Schneidezähne) und M1 beträgt 2.57 ‰, variierend zwischen 1.34 ‰ und 3.66 ‰, je nachdem welcher Milchzahn mit welchem ersten Molaren verglichen wird (es konnte hier nicht pro Individuum verglichen werden, da die Milchzähne von anderen Individuen stammten, als die M1). Bezieht man alle sechs Milchzähne ein und bildet den Mittelwert, so unterscheidet sich dieser vom Mittelwert der ersten Molaren um 2.40 ‰. Die Unterschiede zwischen M1 und M3 sind nur geringfügig kleiner, nämlich im Mittel 2.36 ‰ (Standardabweichung: 0.46 ‰), schwankend zwischen 1.96 ‰ (bei Individuum 6) und 2.92 ‰ (bei Individuum 3). Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Zahntypen sind folglich deutlich größer, als bei den Knochenproben. Dies hängt vermutlich damit zusammen, dass bei den Knochen der Ferkel auch noch pränatale Einflüsse eine Rolle spielen, während die ersten Molaren nahezu ausschließlich die Stillphase widerspiegeln.

Allgemein wird der Stilleffekt für menschliche Zähne und Knochen meistens mit Werten zwischen 0.5 und 1.2 ‰ Anreicherung angegeben (Wright & Schwarcz 1998, Wright & Schwarcz 1999, Dupras & Tocheri 2007, Gregoricka 2014, Britton et al. 2015, Pederzani & Britton 2018). Leider existieren hierzu auch widersprüchliche Angaben, sowie eine hohe Variabilität an publizierten Richtwerten. Wright & Schwarcz (1998) verglichen die $\delta^{18}\text{O}(\text{CO}_3^{2-})$ -Werte verschiedener menschlicher Zahntypen von archäologischen Funden aus Guatemala und fanden im Mittel Unterschiede von 0.5 ‰ (Prämolare vs. Dritte Molare) bis 0.7 ‰ (Erste Molare vs. Dritte Molare). Bei White et al. (2004) hingegen waren Zähne, die vor dem Abstillen mineralisieren in ihren $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Verhältnissen sogar um ca. 1 ‰ niedriger als Zähne, die erst nach dem Abstillen mineralisieren, obwohl sie laut Stilleffekt-Hypothese diesen gegenüber erhöht sein sollten. Dafür waren die Zähne, die vom Stilleffekt betroffen sein sollten in dieser Studie erwartungsgemäß gegenüber den Knochen der Mutter um durchschnittlich 1.2 ‰ angereichert. In einer anderen Studie von White et al. (2004) waren die $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Werte von menschlichen Zähnen, die zwischen 2 und 13 Jahren mineralisieren im Schnitt um ca. 0.9 bis 1.6 ‰ gegenüber adultem Knochen erhöht. Auch hier lagen interessanterweise die vor dem Abstillen mineralisierenden Zähne niedriger als die danach mineralisierenden Zahntypen. Williams et al. (2005) untersuchten $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ menschlicher Knochen von Kindern (vor dem Abstillen) aus der postklassischen Maya-Zeit und verglichen sie mit den entsprechenden Knochen von Erwachsenen. Dabei kamen sie je zu keinem konsistenten Ergebnis: an einem Fundort waren die Unterschiede geringer als 0.1 ‰, am anderen ca. 0.72 ‰. In anderen Quellen (aus archäologischem Kontext) wird eine durchschnittliche Anreicherung von $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ in Kinderknochen um 0.7 ‰ gegenüber adultem Knochen angegeben (White et al. 2000, White et al. 2004). White et al. (2004) hingegen kamen bei ihren Vergleichen von $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ in menschlichen Knochen von Kindern im Stillalter gegenüber Knochen abgestillter Kinder sogar zu Differenzen von 1.8 bis 2.4 ‰ (ebenfalls archäologisches Fundgut). Es zeigt sich also bereits in den Literaturangaben, dass der Stilleffekt davon abhängt, wie lange gestillt wurde, welche Gewebe- bzw. Proben typen miteinander verglichen werden und auch, dass alleine bei menschlichen Daten eine gewisse Uneinigkeit darüber herrscht, wie genau der Stilleffekt zu quantifizieren ist.

Die hier generierten Daten der Knochenproben passen prinzipiell zu den gängigsten Literaturwerten für den Menschen. Die Unterschiede beim Zahnschmelz hingegen sind mit bis über 3.5 ‰ zwischen Milchzähnen und ersten Molaren teilweise deutlich höher. Dies ist sehr wahrscheinlich einerseits der Tatsache geschuldet, dass die Zähne von Schweinen zu anderen Zeiten mineralisieren, als die von Menschen und somit in einem anderen Ausmaß den Stilleffekt widerspiegeln. Außerdem ist es wichtig zu bemerken, dass fast alle Angaben zum Stilleffekt im Menschen aus archäologischen Daten generiert wurden, die nicht zwangsläufig die beste Grundlage für allgemeingültige Aussagen zu physiologischen

Prozessen darstellen. Sie können durch unbekannte weitere Faktoren (Nahrungswechsel, Migration,...), sowie durch Diagenese etc. zusätzlich beeinflusst sein (White et al. 2004, White et al. 2004). Wie oben aufgezeigt kommen manche archäologischen Studien auch zu abweichenden Ergebnissen, die dann vermutlich solchen Effekten geschuldet sind.

Zusammenfassend lässt sich für die $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Ergebnisse dieser Studie sagen, dass es weder Sinn macht alle Zähne, noch alle Knochen zusammen zu betrachten. Bei den Zähnen ist der Zahntyp in Verbindung mit dem Stilleffekt und den Verhältnissen während der Bildungszeit ausschlaggebend. Bei den Knochen müssen Wachstums- und Turnoverraten des jeweiligen Knochentyps in Kombination mit potentielltem Stilleffekt und Beprobungszeitpunkt berücksichtigt werden. Der Stilleffekt scheint im Allgemeinen den größten Einfluss auf Variation innerhalb der Phosphatwerte zu haben, jedoch je nach Probenotyp in unterschiedlichem Ausmaß. Außerdem kann nicht ausgeschlossen werden, dass auch die Alters- und damit Körpermasseunterschiede zwischen Ferkeln und Schweinen zu einer Erhöhung der Variabilität der Daten geführt hat.

a) *Lineare Regression und konstante Fraktionierung*

Für die Schätzung von $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Verhältnissen existieren in der Literatur nur einfache lineare Ansätze und keine Massebilanz-Modelle. Von Longinelli (1984) wurde eine lineare Regressionsgleichung getestet, die (wie bereits die Formel für das Körperwasser) anhand von einer relativ geringen Stichprobe von Schweineproben (Knochen) und den zugehörigen lokalen $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}})$ -Werten etabliert wurde:

$$\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-}) = 0.86 * \delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{meteor}}) + 22.71$$

Solche artspezifischen Gleichungen werden in entsprechenden Studien an Skelettmaterial immer wieder angewandt und zur Identifikation nicht-lokaler bzw. nicht zu den lokalen Bedingungen passender Werte herangezogen (Ayliffe et al. 1992, Chillón et al. 1994, Daux et al. 2008). Allerdings wurden auch Zweifel an der Methode geäußert, weil die Fehlerfortpflanzung durch die Umrechnung teilweise zu einer so starken Erhöhung der Unsicherheit führt, dass geografische Unterschiede nicht mehr mit ausreichend großer Signifikanz voneinander abgegrenzt werden können und möglicherweise die innerartliche Variabilität (z.B. durch Evaporationsprozesse oder Ernährungsweise) höher ist, als die Regressionsgleichungen erwarten lassen (Levinson et al. 1987, Huertas et al. 1995, Daux et al. 2008, Pollard et al. 2011, Lightfoot & O'Connell 2016, Pederzani & Britton 2018). Diese Zweifel werden durch die hier vorliegenden Ergebnisse gestärkt. Das Modell nach Longinelli (1984) sagt die Bandbreite zu erwartenden $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Verhältnisse nicht korrekt anhand des Trinkwassers voraus. Das liegt, im Gegensatz zum Körperwasser jedoch nicht daran, dass durch die gegebene Spanne von $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ kein ausreichend großer Wertebereich vorgegeben wird, denn die Gesamtheit aller nicht vom Stilleffekt betroffener $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Werte streut weniger stark, als die $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ -Proben. Grund hierfür könnte sein, dass in den mineralisierten Hartgeweben die kurzfristigen isotopischen Schwankungen welche im Körperwasser zu sehen sind, über die lange Integrationszeit hinweg zu einem konstanteren Wert gemittelt werden (Tütken 2010, Green et al. 2018). Die durch die Regressionsgleichung vorhergesagten Grenzwerte liegen jedoch insgesamt höher als die Messwerte. Tatsächlich fällt so etwa die Hälfte der adulten Knochen aus der vorhergesagten Spanne, wohingegen die Zahnschmelzproben recht gut dazu passen. Dies ist insofern unerwartet, dass die von Longinelli (1984) publizierte Gleichung für Schweineknochen- und nicht –zähne entwickelt wurde. Die ersten Molaren fallen erwartungsgemäß alle aus dem berechneten Grenzwertbereich, weil das Modell keinen Stilleffekt berücksichtigt.

Die Knochen von Individuum 2, welche nach oben hin vom Rest der Proben abweichen, werden hingegen vom Grenzbereich erfasst, obwohl auch sie wie oben beschrieben vermutlich teilweise vom Stilleffekt betroffen sind. Die Erklärungsansätze, warum das Modell offenbar zu hohe $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Werte vorhersagt, sind ähnlich wie die bei $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$: Das Trinkwasser als einzige Variable für die Schätzungen heranzuziehen, vernachlässigt zu viele andere Faktoren, die in solchen Regressionen pauschal für eine ganze Tierart zu einer fixen Steigung und Achsenverschiebung zusammengefasst werden. So könnte es beispielsweise sein, dass die höher liegenden Zahnproben stärker vom Hochenergiefutter (mit erhöhten $\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnissen) beeinflusst sind (bei den Milchzähnen aufgrund der Ernährung der Muttersau, bei den dritten Molaren aufgrund der kraftfutterhaltigen Ernährung während der ersten Monate nach dem Abstillen), oder von Körpergröße-abhängigen Evaporationseffekten. Demnach würden in der Stichprobe von Longinelli (1984) andere Bedingungen zu einer Regression geführt haben, die zufällig höhere Werte voraussagt, als sie zu den hier untersuchten Knochen passen (z.B. Saisonale Variation des Trinkwassers, höhere $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$ - und $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$ -Verhältnisse usw.).

Die Unsicherheit bei der Schätzung von $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ basierend allein auf $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ ist hier theoretisch sogar noch größer als bei der Schätzung von $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$, weil darin nicht nur die Abhängigkeit des Körperwassers vom lokalen Umweltwasser enthalten ist, sondern zusätzlich auch die darauf folgende Fraktionierung zwischen Körperwasser und Phosphatsauerstoff im Knochenapatit. Angesichts dieser groben Vereinfachungen des Ansatzes der linearen Regression, der Vernachlässigung anderer Faktoren und innerartlicher Variabilität derselben, sowie der geringe Ausgangsstichprobengröße von Longinelli (1984), ist es erstaunlich, dass die Vorhersagen der $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Werte zumindest grob zutreffen und eine gewisse Überschneidung mit den gemessenen Werten aufweisen. Es ist dringend anzuraten, die Regressionsformel durch eine Erweiterung der Datensätze zu vergrößern (großflächige Datenerhebung mit ausreichend großen Stichproben von den verschiedenen Standorten), zusätzliche kontrollierte Experimente durchzuführen und dann die Unsicherheitsbereiche drastisch zu erweitern. Bis dahin sollten Aussagen, die auf solchen einfachen Umrechnungen basieren, mit äußerster Zurückhaltung gemacht werden und im Zweifelsfall lieber statistische Ausreißer direkt aus der Gesamtheit der $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Proben identifiziert werden, wie beispielsweise von Pollard et al. (2011) vorgeschlagen.

Neben der Umrechnung von Umweltwasserdaten in Phosphatwerte wurde außerdem die These geprüft, dass $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ in gleichwarmen Tieren mit einem festen Deltawert zusammenhängen, wie es von vielen Autoren angegeben wurde. Berechnet man die Differenz aus $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ für alle hier untersuchten Individuen (einschließlich Ferkeln), so ergeben sich für die (nicht oder kaum vom Stilleffekt beeinflussten) Zähne zwischen 16.29 ‰ und 20.52 ‰, wobei jeweils der Mittelwert der Körperwasser-Daten eines Individuums berechnet wurde und dieser dann vom jeweiligen Zahntyp (Milchzähne bei Ind. 1 und 2, M3 bei Ind. 3-6) abgezogen wurde. Dasselbe wurde für jeden Knochentyp gemacht, wobei sich Differenzen zwischen 14.94 ‰ und 20.11 ‰ ergaben. Die einzelnen Differenzen finden sich in **Tabelle 55**. Offenbar gibt es hier also eine hohe Variabilität von bis über 4 ‰ bei den Zähnen und über 5 ‰ bei den Knochen. Lässt man die Ferkel außer Acht, so variieren die Differenzen bei den Zähnen noch immer um mehr als 2 ‰ und bei den Knochen um fast 3 ‰. Diese Unterschiede lassen sich leicht auf eine inter-individuelle zeitabhängige Ursache zurückführen, da die Werte für Tiere desselben Zeitraumes ähnlich sind (bei den Knochen relativ unabhängig vom Knochentyp), sich jedoch die verschiedenen Beprobungszeiträume deutlich unterscheiden (Ferkel vs. Schlachtung 1 vs. Schlachtung 2). Das liegt daran, dass das jeweilige Körperwasser sich über die Zeit hinweg stark verändert hat, während die Phosphatproben in ihren $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Werte relativ einheitlich sind, besonders dann, wenn man Zähne und Knochen getrennt betrachtet.

Besonders bei den Ferkeln zeigt sich aber auch, dass es darüber hinaus auch Unterschiede zwischen verschiedenen Knochentypen gibt, die jeweils eine andere Turnover- bzw. Wachstumsrate besitzen und deswegen einen Futterwechsel (oder sonstige Veränderungen) unterschiedlich schnell aus dem Körperwasser übernehmen. Bei Zähnen muss das auch für adulte Individuen beachtet werden, da hier der Stilleffekt auch noch Jahrzehnte später eine Rolle spielen und zu drastisch höheren Differenzen zwischen aktuellem $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ und dem $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ aus der Stillzeit führen kann. Damit stellt sich die Frage, wie sinnvoll es überhaupt ist, feste Fraktionierungswerte zwischen Körperwasser und Phosphat anzuwenden. Je nachdem, wann die jeweilige $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Probe genommen wird, kann es zu drastischen Unterschieden kommen. Für eine sinnvolle Berechnung von $\alpha_{\text{PO}_4\text{-KW}}$ müssten nämlich zumindest über ein Jahr hinweg regelmäßig Beprobungen von $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ stattfinden und diese zu einem globalen, gewichteten Mittel kombiniert werden, idealerweise unter Berücksichtigung der jeweiligen Turnover-Rate (und damit Repräsentationszeit) der einzelnen Knochen- bzw. Zahntypen.

Wie in den Ergebnissen gezeigt, passt der eigens an Schweineknochen etablierte Wert für $\alpha_{\text{PO}_4\text{-KW}}$ von 1.0209 aus Longinelli (1984) überhaupt nicht gut zu den tatsächlichen Differenzen, weil er (wie bereits die Vorhersage anhand von $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$) zu hoch ansetzt und eher zu den Zähnen passt, als zu den Knochen. Sogar alle durch den Stilleffekt erhöhten Proben werden auch ohne das Körperwasser der Ferkel mit einzubeziehen erfasst, ein Großteil der nicht vom Stilleffekt betroffenen Knochen hingegen fällt heraus. Wendet man den Fraktionierungsfaktor von d'Angela & Longinelli (1990) für Rinderknochen von 1.0172 bis 1.0175 auf die hier untersuchten Proben an, ergeben sich deutlich niedrigere Vorhersagen für $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$, in die sogar die meisten Knochenproben der hier untersuchten Schweine fallen, nicht aber die Zähne. Am besten zu den hier untersuchten Schweineknochen-Ergebnissen passen irritierenderweise die Fraktionierungsfaktoren, welche von Luz & Kolodny (1985) und Podlesak et al. (2008) anhand von Zahnschmelz an Ratten ermittelt wurden. Dass ausgerechnet die physiologischen Parameter von Ratten am besten für die Anwendung an Schweinen geeignet sein sollen, erscheint nicht plausibel. Aller Wahrscheinlichkeit nach spielen hier noch weitere unbekannte Faktoren eine Rolle, die sich artunabhängig zwischen den verschiedenen Studien unterscheiden.

Auch die meisten, nicht vom Stilleffekt betroffenen Zahnschmelzproben fallen innerhalb der sich daraus ergebenden Grenzwerte, allerdings werden die vom Stilleffekt betroffenen Proben auch dann nicht miteingeschlossen, wenn man das Körperwasser der Ferkel hinzuzieht. Wie sind diese Ergebnisse nun angesichts der Hypothese eines feststehenden Fraktionierungsfaktors zwischen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ und $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ zu interpretieren? Fest steht, dass ein einzelner Körperwasser-Wert nicht auszureichen scheint, um daraus direkt über die Erhöhung um einen bestimmten Promillewert die eindeutige $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Isotopie eines bestimmten Zahnes oder Knochens zu errechnen. Sicherlich stellen auch die niedrigen Stichprobengrößen bei der Ermittlung der entsprechenden Fraktionierungsfaktoren ein Problem dar. Womöglich besteht tatsächlich eine direkte einheitliche Verschiebung zwischen Körperwasser und Knochen- bzw. Zahnschmelz-Phosphat. Jedoch ist $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ auch unter relativ kontrollierten und lokalen Bedingungen hoch variabel und die verschiedenen Skelettelemente integrieren $\delta^{18}\text{O}$ über unterschiedliche Zeiträume, die jeweils von anderen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Bedingungen (Reste des Stilleffektes, Futterwechsel, saisonale klimatische Veränderungen) geprägt sein können. Das macht es sehr unwahrscheinlich, dass die Isotopie des gesamten Skeletts anhand einer einzigen Körperwasser-Probe berechnet werden kann. Interessant ist aber auch, dass Milchzähne und dritte Molare sich isotopisch stark ähneln, während sie zusammengenommen von den Knochenproben signifikant abweichen. Die M3 sollten theoretisch eine ähnliche zeitliche Isotopenmischung abbilden wie die Knochen, während die Milchzähne allein vom Kreislauf der Muttersau geprägt sind. Es kann also durchaus sein, dass auch ein systematischer Unterschied bei der Fraktionierung des Bioapatits gegenüber dem Körperwasser zwischen Zahnschmelz und Knochen existiert.

Möglicherweise kommen die beobachteten Muster aber auch dadurch zustande, dass Milchzähne und M3 zufällig eine ähnliche kraftfutterreiche Ernährung widerspiegeln und die Knochen der adulten Tiere die Niedrigenergiefutter-Ernährung. In zukünftigen Studien würde sich aber definitiv ein näherer Blick darauf lohnen, ob es einen prinzipiellen Unterschied zwischen Apatit-Bildung im Zuge der Amelogenese und des Knochenwachstums gibt, der sich auf den jeweiligen $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Wert auswirkt.

Tabelle 55 Differenzen zwischen verschiedenen $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Proben und dem Körperwasser für die einzelnen Individuen (in ‰).

	Zahn - KW	Femur - KW	Mandibel - KW	Pars petrosa - KW	Fuß - KW
Ind. 1	16.29	16.06	15.74	14.94	
Ind. 2	17.51	18.37	17.89	16.68	
Ind. 3	20.52	20.11	19.77	19.82	19.91
Ind. 4	20.02	19.25	19.54	19.44	19.64
Ind. 5	18.79	18.09	18.39	18.46	18.09
Ind. 6	18.37	17.36	17.86	17.16	17.26

D. Fazit und Implikationen

Bei der Sauerstoffisotopenanalyse der untersuchten Proben hat sich gezeigt, dass gängige Modelle zur Vorhersage von $\delta^{18}\text{O}$ -Werten verschiedener Materialien durchaus hilfreich sein können. So hat sich die Schätzung der Trinkwasserwerte mittels der OIPC-Methode für Niederschlagswasser in diesem Fall als höchst präzise erwiesen, auch wenn die für die Niederschläge vorhergesagten saisonalen Schwankungen nicht im Quell- und Leitungswasser vorhanden waren. Bei den verschiedenen Modelltypen zur Schätzung der Sauerstoffisotopen der verschiedenen Körperbestandteile gibt es sowohl bei den linearen Ansätzen, als auch bei den Massebilanzmodellen, Vor- und Nachteile. Während die linearen Modelle mit wenigen Variablen auskommen und damit universeller einsetzbar sind, können sie gleichzeitig aber auch nicht alle relevanten Aspekte berücksichtigen und somit an Präzision und Zuverlässigkeit einbüßen. Massebilanzmodelle hingegen sind komplexer und liefern eine sehr viel detailliertere Abbildung der verschiedenen Einflussparameter, jedoch sind hierfür viele Hintergrundinformationen nötig und es muss oft auf Vergleichs-, Literatur- und Schätzwerte zurückgegriffen werden. Dadurch werden Massebilanzmodelle fehleranfällig und es kommt zu Fortpflanzungsfehlern durch Unsicherheiten bei den einzelnen Variablen. In vielen Fällen sind die Variablen auch schlichtweg unbekannt und die Massebilanzmodelle somit häufig nicht einsetzbar. Selbst in einer Studie wie dieser, in welcher zumindest einige Werte direkt gemessen werden konnten, war es nicht immer möglich, zufriedenstellende Vorhersagen zu treffen. Festgehalten werden kann auch, dass bestimmte Aspekte, wie beispielsweise Wachstum und bestimmte saisonale, individuelle oder sonstige Variabilität nicht ausreichend erforscht sind, bzw. nicht in den entsprechenden Modellen berücksichtigt werden.

Der Stilleffekt ist ebenfalls eine entscheidende Komponente beim Zustandekommen der Verteilung und Variabilität der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte innerhalb der verschiedenen hier untersuchten Gewebeproben. Wie stark der Einfluss dieses Effektes ausfällt, hängt davon ab, wie stark sich die Bildungs- bzw. Repräsentationszeit eines bestimmten Gewebes mit der Stillphase überschneidet (siehe **Abbildung 50**). Dadurch kommt es in den verschiedenen Probenotypen zu einer unterschiedlich starken Anreicherung der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte, sodass man eigentlich nicht von einer konstanten Fraktionierung, sondern eher von einer graduellen Anreicherung sprechen kann.

Bereits angesichts der hier untersuchten Proben erscheint es höchst fraglich, ob dem Stilleffekt ein fester universeller Wert beigemessen werden kann, den man von einer Probe abziehen muss, um den unverfälschten lokalen $\delta^{18}\text{O}$ -Wert zu erhalten. Tatsächlich ist der Stilleffekt bisher nur unzulänglich erforscht worden (Pederzani & Britton 2018). Die meisten Angaben stammten aus Vergleichen mineralisierter Hartgewebe von archäologischen Skelettfunde, zu denen dementsprechend keine weiteren Hintergrundinformationen vorhanden sind, über die man Stilleffekt und andere Faktoren voneinander abgrenzen könnte. Darüber hinaus existieren in der Literatur fast keine Angaben über den Stilleffekt zu nichtmenschlichen Säugetieren. Die wenigen vorhandenen modernen Studien beschäftigen sich nicht mit mineralisierten Hartgeweben, sondern mit Körpersekreten wie Milch oder Säuglingsurin (Roberts et al. 1988, Ehtesham et al. 2015).

Alles in allem muss man den Stilleffekt wohl als ein weitaus komplexeres Thema betrachten, als es in vielen Studien bisher der Fall gewesen ist. Erstens darf man ihn nicht nur beim Menschen erwarten, sondern auch bei domestizierten und wilden Tieren, welche gerade in anthropologischen Arbeiten oftmals als Referenz für lokale Grenzwerte herangezogen werden. Zweitens darf der Stilleffekt weder artübergreifend, noch für verschiedene Standorte und noch nicht einmal für unterschiedliche Gewebetypen desselben Individuums generalisiert werden. Je nach Tierart können Unterschiede in der Lebensweise, im Wachstum bzw. der Mineralisation und in den jeweiligen Turnover-Raten zu unterschiedlich starker Ausprägung des Stilleffektes führen. Genauso spielt bei Körperbestandteilen, die im Laufe des Lebens kontinuierlichem Turnover unterworfen sind, das Alter eine entscheidende Rolle dabei, wieviel Stilleffekt noch in einem Gewebe übrig ist. Weich- und Hartgewebe müssen jeweils getrennt betrachtet werden, und selbst die verschiedenen Knochen- oder Zahntypen können den Stilleffekt unterschiedlich stark repräsentieren. Letztendlich darf der Stilleffekt nicht als Fraktionierungsfaktor oder feste Verschiebung (beispielsweise um „+ 0.7 ‰“) verstanden werden, sondern als komplexer Prozess, der eigentlich in jedem Einzelfall gesondert eingeschätzt werden sollte.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, wie notwendig zukünftige Arbeiten zum Stilleffekt sind, die experimentell die Anreicherung durch konsumierte Muttermilch in der Stillphase von anderen Faktoren unterscheiden und daraus erweiterte Massebilanz-Modelle entwickeln, die den Stilleffekt miteinbeziehen. In solchen Modellen würde der Einfluss von Muttermilch und körpergrößenabhängiger Anreicherung des Körperwassers so einbezogen, dass über die Kombination mit Außenfaktoren (Temperatur, Jahreszeit usw.), individueller Variabilität (z.B. Aktivitätslevel, Körpermasse, Wachstum usw.) eine plausible fallspezifische Anreicherung abgeschätzt werden könnte. Leider ist die Datengrundlage dieser Studie nicht ausreichend, um ein solches erweitertes Modell, zum Beispiel basierend auf Bryant & Froelich (1995) oder Kohn (1996) (für Körperwasser und Phosphat) bzw. Gretebeck et al. (1997), Ehleringer et al. (2008) oder Podlesak et al. (2008) (für Borsten bzw. Haare) zu entwickeln. Es fehlen auch Vergleichsmessungen der Muttermilch, um direkte Vergleiche mit den jeweiligen Geweben anstellen zu können. Sehr wohl reichen die Daten aber aus, um die Notwendigkeit der Entwicklung solcher Modelle aufzuzeigen. Diese wären in der Archäometrie von Nutzen, da in prähistorischen und historischen Gräberfeldern subadulte Individuen häufig überrepräsentiert sind (Grupe et al. 2015). Aber gerade auch im Bereich der Lebensmittelforschung wäre eine konkretere Kenntnis und Modellierung des Stilleffektes hilfreich, da die große Masse aller für die Fleischproduktion gehaltenen Tiere in einem sehr jungen Alter geschlachtet werden (Geo 23.05.2019).

VIII. Zusammenfassung und Ausblick

Für diese Arbeit wurden die stabilen Isotope von Strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) und Sauerstoff ($\delta^{18}\text{O}$) im Zuge einer kontrollierten Fütterungsstudie mit Schweinen von einem ökologisch geführten landwirtschaftlichen Betrieb untersucht. Es wurden sowohl Umweltproben in Form von Boden und Wasser, als auch Futter- und Gewebeproben der untersuchten Tiere selbst analysiert. Die Extraktion der jeweiligen Elemente und die anschließende Messung der stabilen Isotopenverhältnisse konnte für fast alle beprobten Materialien erfolgreich durchgeführt werden. Eine Ausnahme stellt die Strontiumextraktion aus den untersuchten Borstenproben dar. Hier konnte die publizierte Methode nicht erfolgreich repliziert werden, da das exogene Strontium vermutlich nicht vollständig entfernt wurde. Dies ist insofern ein hilfreiches Ergebnis, dass die angewandte Methode offenbar nicht universell anwendbar ist und hier somit weitere Experimente vonnöten sind. Dasselbe gilt auch für die Isolation des bioverfügbaren Strontiums aus den getesteten Bodenproben. Alle weiteren Messungen können jedoch als plausibel und verlässlich angesehen werden. Viele bisherige Thesen und Erkenntnisse konnten in dieser Studie bestätigt werden, wie zum Beispiel die Fraktionierung von $\delta^{18}\text{O}$ in diversen biologischen Prozessen, die Strontiumkonzentrationen verschiedener Probenotypen und die Einengung der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Variabilität mit steigender Trophieebene (Biopurifikation). Allerdings konnte für den Fall der Biopurifikation festgestellt werden, dass diese verstärkt in solchen Gewebetypen auftritt, die die verschiedenen Einflüsse über ausreichend lange Zeiträume mitteln, in Geweben mit hohen Turnoverraten hingegen kaum. Studien, die sich mit kurzlebigen Weichgeweben beschäftigen, sollten diesen Faktor zukünftig unbedingt berücksichtigen um verlässliche Aussagen über die Herkunft von Geweben bzw. Produkten treffen zu können.

Die Trinkwasserwerte konnten für beide Isotopensysteme als über die Zeit hinweg konstant angesehen werden und schwankten vergleichsweise wenig. Während das Trinkwasser den bedeutendsten Input für $\delta^{18}\text{O}$ darstellt, kommt ihm bei $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ein eher untergeordneter Stellenwert zu, weil hier das Futter einen größeren Einfluss hat. Die Änderungen der Fütterungsweise konnten dennoch bei beiden Isotopensystemen in den Körpergeweben der Versuchstiere nachgewiesen werden. Dabei spielen sowohl für $\delta^{18}\text{O}$, als auch für $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ die Turnoverraten und Repräsentationszeiten der verschiedenen Gewebe eine ausschlaggebende Rolle. Hinzu kommt ein Aspekt, der in den gängigen Modellen bisher oft nicht berücksichtigt worden ist: das Wachstum bei noch nicht adulten Individuen. Gerade für Arten, bei denen die Schlachtung häufig vor dem vollständigen Erreichen der maximalen Körpergröße stattfindet, müssen Wachstumsprozesse unbedingt in die Modelle integriert werden. Des Weiteren sind zusätzliche Analysen bezüglich der Ausprägung des sogenannten Stilleffektes bei $\delta^{18}\text{O}$ nötig, um diese trophiestufenabhängige isotopische Anreicherung fallspezifisch korrekt vorhersagen zu können. Dies wäre sowohl in der Archäometrie und der Forensik, als auch in der Ökologie und Lebensmittelkontrolle von großem Vorteil.

Auch im Allgemeinen hat sich gezeigt, dass die herkömmlichen Modelle und Richtwerte zwar einen guten Anhaltspunkt auf die ungefähren Isotopen an einem Standort liefern können, jedoch häufig die tatsächliche Variabilität unterschätzt wird. Dies gilt wohl insbesondere im modernen Kontext und für die Betrachtung nichtmineralisierter Weichgewebe. Außerdem sind komplexere Modelle sehr anfällig für Fehleinschätzungen, wenn bestimmte Parameter (z.B. Fraktionierungsfaktoren) nicht korrekt oder präzise genug geschätzt werden. Hier sind noch weitere Studien nötig, um für verschiedene Umstände und Arten angepasste Modelle zu entwickeln. Diese Arbeit hat einen wichtigen Beitrag dazu geleistet, durch die Untersuchung eines tatsächlichen Fallbeispiels, das Potential, aber auch die Verbesserungsfähigkeit der Stabilisotopenanalyse zur Herkunftsbestimmung aufzuzeigen und einzuschätzen.

IX. Literaturverzeichnis

Abeni, F., Petrera, F., Capelletti, M., Dal Prà, A., Bontempo, L., Tonon, A., Camin, F. (2015). "Hydrogen and oxygen stable isotope fractionation in body fluid compartments of dairy cattle according to season, farm, breed, and reproductive stage." PloS one **10**(5): e0127391.

Åberg, G. (1995). The use of natural strontium isotopes as tracers in environmental studies. Biogeochemical Monitoring in Small Catchments, Springer: 309-322.

Åberg, G., Fosse, G., Stray, H. (1998). "Man, nutrition and mobility: a comparison of teeth and bone from the Medieval era and the present from Pb and Sr isotopes." Science of the Total Environment **224**(1-3): 109-119.

Åberg, G., Jacks, G., Hamilton, P. J. (1989). "Weathering rates and $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ ratios: an isotopic approach." Journal of Hydrology **109**(1-2): 65-78.

Åberg, G., Jacks, G., Wickman, T., Hamilton, P. (1990). "Strontium isotopes in trees as an indicator for calcium availability." Catena **17**(1): 1-11.

Adams, M., Grierson, P. (2001). "Stable isotopes at natural abundance in terrestrial plant ecology and ecophysiology: an update." Plant Biology **3**(04): 299-310.

Aggarwal, P. K., Araguás-Araguás, L. J., Groening, M., Kulkarni, K. M., Kurtas, T., Newman, B. D., Vitvar, T. (2010). Global hydrological isotope data and data networks. Isoscapes, Springer: 33-50.

Ahrens, C., Koeniger, P., van Geldern, R., Stadler, S. (2013). Stable oxygen and hydrogen isotopes of brines-comparing isotope ratio mass spectrometry and isotope ratio infrared spectroscopy. EGU General Assembly Conference Abstracts.

Aizen, V., Aizen, E., Melack, J., Martma, T. (1996). "Isotopic measurements of precipitation on central Asian glaciers (southeastern Tibet, northern Himalayas, central Tien Shan)." Journal of Geophysical Research: Atmospheres **101**(D4): 9185-9196.

Allison, G., Gat, J. R., Leaney, F. W. (1985). "The relationship between deuterium and oxygen-18 delta values in leaf water." Chemical Geology: Isotope Geoscience section **58**(1-2): 145-156.

Altman, P. L., Dittmer, D. S. (1968). "Metabolism." Federation of American Societies for Experimental Biology, Bethesda, Maryland.

Altman, P. L., Dittmer, D. S. (1971). "Respiration and circulation". Federation of American Societies for Experimental Biology, Bethesda, Maryland.

Ambrose, S. H. (2002). Controlled diet and climate experiments on nitrogen isotope ratios of rats. Biogeochemical approaches to paleodietary analysis, Springer: 243-259.

Anders, D., Osmanovic, A., Vohberger, M. (2018). "Intra- and inter-individual variability of stable strontium isotope ratios in hard and soft body tissues of pigs." Rapid Communications in Mass Spectrometry **15**(3): 281-290.

Angel, P. M., Orlando, R. (2006). "Trypsin is the primary mechanism by which the ^{18}O isotopic label is lost in quantitative proteomic studies." Analytical biochemistry **359**(1): 26-34.

Araguás-Araguás, L., Froehlich, K., Rozanski, K. (1998). "Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia." Journal of Geophysical Research: Atmospheres **103**(D22): 28721-28742.

Araguás-Araguás, L., Froehlich, K., Rozanski, K. (2000). "Deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation and atmospheric moisture." Hydrological processes **14**(8): 1341-1355.

ATSDR (2004). "Public Health Statement – Strontium". Agency for Toxic Substances and Disease Registry CAS#: 7440-24-6

Ayliffe, L., Lister, A., Chivas, A. (1992). "The preservation of glacial-interglacial climatic signatures in the oxygen isotopes of elephant skeletal phosphate." Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology **99**(3-4): 179-191.

Ayliffe, L. K., Chivas, A. R. (1990). "Oxygen isotope composition of the bone phosphate of Australian kangaroos: potential as a palaeoenvironmental recorder." Geochimica et Cosmochimica Acta **54**(9): 2603-2609.

Baffi, C., Trincherini, P. R. (2016). "Food traceability using the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic ratio mass spectrometry." European Food Research and Technology **242**(9): 1411-1439.

Bahar, B., Monahan, F. J., Moloney, A. P., O'Kiely, P., Scrimgeour, C. M., Schmidt, O. (2005). "Alteration of the carbon and nitrogen stable isotope composition of beef by substitution of grass silage with maize silage." Rapid Communications in Mass Spectrometry: An International Journal Devoted to the Rapid Dissemination of Up-to-the-Minute Research in Mass Spectrometry **19**(14): 1937-1942.

Balasse, M. (2002). "Reconstructing dietary and environmental history from enamel isotopic analysis: time resolution of intra-tooth sequential sampling." International Journal of Osteoarchaeology **12**(3): 155-165.

Balasse, M., Obein, G., UGHETTO-MONFRIN, J., Mainland, I. (2012). "Investigating seasonality and season of birth in past herds: a reference set of sheep enamel stable oxygen isotope ratios." Archaeometry **54**(2): 349-368.

Banner, J. L. (2004). "Radiogenic isotopes: systematics and applications to earth surface processes and chemical stratigraphy." Earth-Science Reviews **65**(3-4): 141-194.

Barbaste, M., Robinson, K., Guilfoyle, S., Medina, B., Lobinski, R. (2002). "Precise determination of the strontium isotope ratios in wine by inductively coupled plasma sector field multicollector mass spectrometry (ICP-SF-MC-MS)." Journal of Analytical Atomic Spectrometry **17**(2): 135-137.

Barbour, M., Farquhar, G., Buckley, T. (2017). "Leaf water stable isotopes and water transport outside the xylem." Plant, Cell & Environment **40**(6): 914-920.

Barbour, M. M. (2007). "Stable oxygen isotope composition of plant tissue: a review." Functional Plant Biology **34**(2): 83-94.

Barbour, M. M., Roden, J. S., Farquhar, G. D., Ehleringer, J. R. (2004). "Expressing leaf water and cellulose oxygen isotope ratios as enrichment above source water reveals evidence of a Péclet effect." Oecologia **138**(3): 426-435.

Barnett-Johnson, R., Pearson, T. E., Ramos, F. C., Grimes, C. B., Bruce MacFarlane, R. (2008). "Tracking natal origins of salmon using isotopes, otoliths, and landscape geology." Limnology and Oceanography **53**(4): 1633-1642.

Baroni, M. V., Podio, N. S., Badini, R. G., Inga, M., Ostera, H. A., Cagnoni, M., Gallegos, E., Gautier, E., Peral-García, P., Hoogewerff, J. (2011). "How much do soil and water contribute to the composition of meat? A case study: Meat from three areas of Argentina." Journal of agricultural and food chemistry **59**(20): 11117-11128.

Bataille, C. P., Bowen, G. J. (2012). "Mapping $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ variations in bedrock and water for large scale provenance studies." Chemical Geology **304**: 39-52.

Bataille, C. P., Brennan, S. R., Hartmann, J., Moosdorf, N., Wooller, M., Bowen, G. J. (2014). "A geostatistical framework for predicting variations in strontium concentrations and isotope ratios in Alaskan rivers." Chemical Geology **389**: 1-15.

Beard, B. L., Johnson, C. M. (2000). "Strontium isotope composition of skeletal material can determine the birth place and geographic mobility of humans and animals." Journal of Forensic Science **45**(5): 1049-1061.

Beaver, W. L., Lamarra, N., Wasserman, K. (1981). "Breath-by-breath measurement of true alveolar gas exchange." Journal of Applied Physiology **51**(6): 1662-1675.

Bedford, J., Harrison, G., Raymond, W., Sutton, A. (1960). "Metabolism of strontium in children." British medical journal **1**(5173): 589.

Bentley, R. (2004). Characterising human mobility by strontium isotope analysis of the skeletons. Khok Phanom Di: Summary and Conclusions. Higham, C. F. W., Thosarat, R. Oxford, Oxbow Books.

Bentley, R. A. (2006). "Strontium isotopes from the earth to the archaeological skeleton: a review." Journal of Archaeological Method and Theory **13**(3): 135-187.

- Bentley, R. A., Knipper, C. (2005). "Geographical Patterns in biologically available Strontium, Carbon and Oxygen Isotope Signatures in Prehistoric SW Germany." Archaeometry **47**(3): 629-644.
- Bentley, R. A., Krause, R., Price, T. D., Kaufmann, B. (2003). "Human mobility at the early Neolithic settlement of Vaihingen, Germany: evidence from strontium isotope analysis." Archaeometry **45**(3): 471-486.
- Bentley, R. A., Price, T. D., Stephan, E. (2004). "Determining the 'local' $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ range for archaeological skeletons: a case study from Neolithic Europe." Journal of archaeological science **31**(4): 365-375.
- Beyser, J., Pitz, K., Horn, P., Holz, S., Rauch, E. (2003). "Isotopenanalytik." Kriminalistik **57**(7): 443-452.
- Biondi, L., D'Urso, M., Vasta, V., Luciano, G., Scerra, M., Priolo, A., Ziller, L., Bontempo, L., Caparra, P., Camin, F. (2013). "Stable isotope ratios of blood components and muscle to trace dietary changes in lambs." Animal **7**(9): 1559-1566.
- Biscaye, P., Chesselet, R., Prospero, J. (1974). "Rb-Sr, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope system as an index of provenance of continental dusts in the open Atlantic Ocean." Journal de recherches atmospheriques **8**(3): 819-829.
- Blum, J. D., Taliaferro, E. H., Holmes, R. T. (2001). "Determining the sources of calcium for migratory songbirds using stable strontium isotopes." Oecologia **126**(4): 569-574.
- Blum, J. D., Taliaferro, E. H., Weisse, M. T., Holmes, R. T. (2000). "Changes in Sr/Ca , Ba/Ca and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios between trophic levels in two forest ecosystems in the northeastern USA." Biogeochemistry **49**(1): 87-101.
- Blumenthal, S. A., Cerling, T. E., Chritz, K. L., Bromage, T. G., Kozdon, R., Valley, J. W. (2014). "Stable isotope time-series in mammalian teeth: In situ $\delta^{18}\text{O}$ from the innermost enamel layer." Geochimica et Cosmochimica Acta **124**: 223-236.
- Bocherens, H., Koch, P. L., Mariotti, A., Geraads, D., Jaeger, J.-J. (1996). "Isotopic biogeochemistry (^{13}C , ^{18}O) of mammalian enamel from African Pleistocene hominid sites." Palaeos: 306-318.
- Böhlke, J., Horan, M. (2000). "Strontium isotope geochemistry of groundwaters and streams affected by agriculture, Locust Grove, MD." Applied Geochemistry **15**(5): 599-609.
- Boner, M., Förstel, H. (2004). "Stable isotope variation as a tool to trace the authenticity of beef." Analytical and bioanalytical chemistry **378**(2): 301-310.
- Bony, S., Risi, C., Vimeux, F. (2008). "Influence of convective processes on the isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$ and δD) of precipitation and water vapor in the tropics: 1. Radiative-convective equilibrium and Tropical Ocean–Global Atmosphere–Coupled Ocean–Atmosphere Response Experiment (TOGA-COARE) simulations." Journal of Geophysical Research: Atmospheres **113**(D19).

Borg, L. E., Banner, J. L. (1996). "Neodymium and strontium isotopic constraints on soil sources in Barbados, West Indies." Geochimica et Cosmochimica Acta **60**(21): 4193-4206.

Bottinga, Y., Craig, H. (1968). "Oxygen isotope fractionation between CO₂ and water, and the isotopic composition of marine atmospheric CO₂." Earth and planetary science letters **5**: 285-295.

Bowen, G. (2015). "The online isotopes in precipitation calculator." OIPC (http://wateriso.utah.edu/waterisotopes/pages/data_access/oipc.html (accessed August 2015)).

Bowen, G. J. (2010). Statistical and geostatistical mapping of precipitation water isotope ratios. Isoscapes, Springer: 139-160.

Bowen, G. J., Chesson, L., Nielson, K., Cerling, T. E., Ehleringer, J. R. (2005). "Treatment methods for the determination of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of hair keratin by continuous-flow isotope-ratio mass spectrometry." Rapid Communications in Mass Spectrometry: An International Journal Devoted to the Rapid Dissemination of Up-to-the-Minute Research in Mass Spectrometry **19**(17): 2371-2378.

Bowen, G. J., Ehleringer, J. R., Chesson, L. A., Stange, E., Cerling, T. E. (2007). "Stable isotope ratios of tap water in the contiguous United States." Water Resources Research **43**(3).

Bowen, G. J., Ehleringer, J. R., Chesson, L. A., Thompson, A. H., Podlesak, D. W., Cerling, T. E. (2009). "Dietary and physiological controls on the hydrogen and oxygen isotope ratios of hair from mid-20th century indigenous populations." American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists **139**(4): 494-504.

Bowen, G. J., Revenaugh, J. (2003). "Interpolating the isotopic composition of modern meteoric precipitation." Water Resources Research **39**(10).

Bowen, G. J., Wassenaar, L. I., Hobson, K. A. (2005). "Global application of stable hydrogen and oxygen isotopes to wildlife forensics." Oecologia **143**(3): 337-348.

Bowen, G. J., Wilkinson, B. (2002). "Spatial distribution of $\delta^{18}\text{O}$ in meteoric precipitation." Geology **30**(4): 315-318.

Bowen, H. J. M. (1966). "Trace elements in biochemistry." Academic Press, University of Michigan.

Braithwaite, G., Riazuddin, S. (1971). "The effect of age and level of dietary calcium intake on calcium metabolism in sheep." British Journal of Nutrition **26**(2): 215-225.

Brand, W. A., Coplen, T. B., Vogl, J., Rosner, M., Prohaska, T. (2014). "Assessment of international reference materials for isotope-ratio analysis (IUPAC Technical Report)." Pure and Applied Chemistry **86**(3): 425-467.

Brandt, H., Werner, D., Baulain, U., Brade, W., Weissmann, F. (2010). "Genotype–environment interactions for growth and carcass traits in different pig breeds kept under conventional and organic production systems." Animal **4**(4): 535-544.

Brenninkmeijer, C., Kraft, P., Mook, W. (1983). "Oxygen isotope fractionation between CO₂ and H₂O." Chemical Geology **41**: 181-190.

Bricout, J. (1973). "Composition en isotopes stables de l'eau des jus de fruits." Ann Fals Exp Chim **66**: 195-202.

Britton, K., Fuller, B. T., Tütken, T., Mays, S., Richards, M. P. (2015). "Oxygen isotope analysis of human bone phosphate evidences weaning age in archaeological populations." American journal of physical anthropology **157**(2): 226-241.

Bronner, F., Aubert, J.-P., Richelle, L., Saville, P., Nicholas, J., Cobb, J. (1963). "Strontium and its relation to calcium metabolism." The Journal of clinical investigation **42**(7): 1095-1104.

Brooks, P., Carpenter, J. (1990). "The water requirement of growing-finishing pigs-theoretical and practical considerations." Recent advances in animal nutrition-1990: 115-136.

Brunel, J.-P., Walker, G., Walker, C., Dighton, J., Kennett-Smith, A. (1991). "Using stable isotopes of water to trace plant water uptake." Stable isotopes in plant nutrition, soil fertility and environmental studies: 543-551.

Bryant, F., Chamberlain, A., Spicer, G., Webb, M. (1958). "Strontium in diet." British medical journal **1**(5084): 1371.

Bryant, F., Loutit, J. F. (1964). "The entry of strontium-90 into human bone." Proc. R. Soc. Lond. B **159**(976): 449-465.

Bryant, J. D., Froelich, P. N. (1995). "A model of oxygen isotope fractionation in body water of large mammals." Geochimica et Cosmochimica Acta **59**(21): 4523-4537.

Bryant, J. D., Koch, P. L., Froelich, P. N., Showers, W. J., Genna, B. J. (1996). "Oxygen isotope partitioning between phosphate and carbonate in mammalian apatite." Geochimica et Cosmochimica Acta **60**(24): 5145-5148.

Bryant, J. D., Luz, B., Froelich, P. N. (1994). "Oxygen isotopic composition of fossil horse tooth phosphate as a record of continental paleoclimate." Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology **107**(3-4): 303-316.

Budd, P., Montgomery, J., Barreiro, B., Thomas, R. G. (2000). "Differential diagenesis of strontium in archaeological human dental tissues." Applied Geochemistry **15**(5): 687-694.

Bühler, R., Postler, G. (2004). "Ökologischer Gesamtzuchtwert Schwäbisch-Hällisches Schwein." Bundesprogramm Ökologischer Landbau FKZ: 02OE396.

Bullen, T., Bailey, S. (2005). „Identifying calcium sources at an acid deposition-impacted spruce forest: a strontium isotope, alkaline earth element multi-tracer approach.“ Biogeochemistry, **74**(1): 63-99.

Burk, R., Stuiver, M. (1981). "Oxygen isotope ratios in trees reflect mean annual temperature and humidity." Science **211**(4489): 1417-1419.

Burton, J., Price, T. (2000). "The use and abuse of trace elements for paleodietary research". In: Ambrose SH, Katzenberg MA, editors. Biogeochemical Approaches to Paleodietary Analysis, New York: Kluwer Academic/Plenum Publishing.

Burton, J. H., Hahn, R. (2016). "Assessing the "local" $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio for humans". Isotopic Landscapes in Bioarchaeology, Springer: 113-121.

Burton, J. H., Price, T. D. (2013). "Seeking the local $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio to determine geographic origins of humans: No easy answers." Armitage RA, Burton (eds) Archaeological Chemistry VIII. American Chemical Society, Washington DC: 309-320.

Burton, J. H., Price, T. D., Cahue, L., Wright, L. E. (2003). "The use of barium and strontium abundances in human skeletal tissues to determine their geographic origins." International Journal of Osteoarchaeology **13**(1-2): 88-95.

Burton, J. H., Price, T. D., Middleton, W. D. (1999). "Correlation of bone Ba/Ca and Sr/Ca due to biological purification of calcium." Journal of archaeological science **26**(6): 609-616.

Burton, J. H., Wright, L. E. (1995). "Nonlinearity in the relationship between bone Sr/Ca and diet: paleodietary implications." American journal of physical anthropology **96**(3): 273-282.

Busch, D. E., Ingraham, N. L., Smith, S. D. (1992). "Water uptake in woody riparian phreatophytes of the southwestern United States: a stable isotope study." Ecological Applications **2**(4): 450-459.

Buzon, M. R., Simonetti, A. (2013). "Strontium isotope ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) variability in the Nile Valley: identifying residential mobility during ancient Egyptian and Nubian sociopolitical changes in the New Kingdom and Napatan periods." American journal of physical anthropology **151**(1): 1-9.

Cai, Z., Tian, L. (2016). "Atmospheric controls on seasonal and interannual variations in the precipitation isotope in the East Asian monsoon region." Journal of Climate **29**(4): 1339-1352.

Camin, F., Bontempo, L., Heinrich, K., Horacek, M., Kelly, S., Schlicht, C., Thomas, F., Monahan, F., Hoogewerff, J., Rossmann, A. (2007). "Multi-element (H, C, N, S) stable isotope characteristics of lamb meat from different European regions." Analytical and bioanalytical chemistry **389**(1): 309-320.

Capo, R. C., Stewart, B. W., Chadwick, O. A. (1998). "Strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: theory and methods." Geoderma **82**(1): 197-225.

Carr, T., Harrison, G., Loutit, J., Sutton, A. (1962). "Movement of strontium in the human body." British medical journal **2**(5307): 773.

Cerling, T. E., Harris, J. M., Ambrose, S. H., Leakey, M. G., Solounias, N. (1997). "Dietary and environmental reconstruction with stable isotope analyses of herbivore tooth enamel from the Miocene locality of Fort Ternan, Kenya." Journal of Human Evolution **33**(6): 635-650.

Cernusak, L. A., Barbour, M. M., Arndt, S. K., Cheesman, A. W., English, N. B., Feild, T. S., Helliker, B. R., Holloway-Phillips, M. M., Holtum, J. A., Kahmen, A. (2016). "Stable isotopes in leaf water of terrestrial plants." Plant, Cell & Environment **39**(5): 1087-1102.

Chamberlain, C., Blum, J., Holmes, R. T., Feng, X., Sherry, T., Graves, G. R. (1996). "The use of isotope tracers for identifying populations of migratory birds." Oecologia **109**(1): 132-141.

Chang, S. J., Blake, R. E. (2015). "Precise calibration of equilibrium oxygen isotope fractionations between dissolved phosphate and water from 3 to 37 C." Geochimica et Cosmochimica Acta **150**: 314-329.

Chau, T. H., Tipple, B. J., Hu, L., Fernandez, D. P., Cerling, T. E., Ehleringer, J. R., Chesson, L. A. (2017). "Reconstruction of travel history using coupled $\delta^{18}\text{O}$ and $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ measurements of hair." Rapid Communications in Mass Spectrometry **31**(6): 583-589.

Chen, G., Auerswald, K. (2018). "A user-friendly calculator for determining oxygen isotope composition of body water in cows based on the MK model and examples of its applications." Computers and Electronics in Agriculture **154**: 248-255.

Chesson, L. A., Podlesak, D. W., Erkkila, B. R., Cerling, T. E., Ehleringer, J. R. (2010). "Isotopic consequences of consumer food choice: hydrogen and oxygen stable isotope ratios in foods from fast food restaurants versus supermarkets." Food Chemistry **119**(3): 1250-1256.

Chesson, L. A., Podlesak, D. W., Thompson, A. H., Cerling, T. E., Ehleringer, J. R. (2008). "Variation of hydrogen, carbon, nitrogen, and oxygen stable isotope ratios in an American diet: fast food meals." Journal of agricultural and food chemistry **56**(11): 4084-4091.

Chesson, L. A., Tipple, B. J., Mackey, G. N., Hynek, S. A., Fernandez, D. P., Ehleringer, J. R. (2012). "Strontium isotopes in tap water from the coterminous USA." Ecosphere **3**(7): 1-17.

Chesson, L. A., Valenzuela, L. O., O'Grady, S. P., Cerling, T. E., Ehleringer, J. R. (2010). "Hydrogen and oxygen stable isotope ratios of milk in the United States." Journal of agricultural and food chemistry **58**(4): 2358-2363.

Chillón, B. S., Alberdi, M. T., Leone, G., Bonadonna, F. P., Stenni, B., Longinelli, A. (1994). "Oxygen isotopic composition of fossil equid tooth and bone phosphate: an archive of difficult interpretation." Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology **107**(3-4): 317-328.

Clark, I. D., Fritz, P. (2013). "Environmental isotopes in hydrogeology", CRC press.

Coelho, I., Castanheira, I., Bordado, J. M., Donard, O., Silva, J. A. L. (2017). "Recent developments and trends in the application of strontium and its isotopes in biological related fields." TrAC Trends in Analytical Chemistry **90**: 45-61.

Comar, C., Russell, R. S., Wasserman, R. (1957). "Strontium-calcium movement from soil to man." Science **126**(3272): 485-492.

Comar, C., Wasserman, R. (1964). "Strontium." Mineral metabolism **2**(Part A): 523-572.

Comar, C., Whitney, I., Lengemann, F. (1955). "Comparative utilization of dietary Sr90 and calcium by developing rat fetus and growing rat." Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine **88**(2): 232-236.

Congjian, S., Yaning, C., Weihong, L., Xingong, L., Yuhui, Y. (2016). "Isotopic time series partitioning of streamflow components under regional climate change in the Urumqi River, northwest China." Hydrological Sciences Journal **61**(8): 1443-1459.

Cook, G. A., Lauer, C. M. (1968). "Oxygen." The encyclopedia of the chemical elements. Reinhold Book Corporation, New York: 499-512.

Cook, P., O'Grady, A. P. (2006). "Determining soil and ground water use of vegetation from heat pulse, water potential and stable isotope data." Oecologia **148**(1): 97.

Coplen, T. (1995). "Reporting of stable carbon, hydrogen, and oxygen isotopic abundances." Reference and intercomparison materials for stable isotopes of light elements **825**: 31-34.

Coplen, T. B. (1988). "Normalization of oxygen and hydrogen isotope data." Chemical Geology: Isotope Geoscience section **72**(4): 293-297.

Coplen, T. B. (2011). "Guidelines and recommended terms for expression of stable-isotope-ratio and gas-ratio measurement results." Rapid Communications in Mass Spectrometry **25**(17): 2538-2560.

Copley, M. S., Jim, S., Jones, V., Rose, P., Clapham, A., Edwards, D. N., Horton, M., Rowley-Conwy, P., Evershed, R. P. (2004). "Short-and long-term foraging and foddering strategies of domesticated animals from Qasr Ibrim, Egypt." Journal of archaeological science **31**(9): 1273-1286.

Cormie, A., Schwarcz, H., Gray, J. (1994). "Relation between hydrogen isotopic ratios of bone collagen and rain." Geochimica et Cosmochimica Acta **58**(1): 377-391.

Cossins, A. (2012). Temperature biology of animals, Springer Science & Business Media.

Coward, W. (1988). "The doubly-labelled-water (2H & 18O) method: principles and practice." Proceedings of the Nutrition Society **47**(3): 209-218.

Craig, H. (1961). "Isotopic variations in meteoric waters." Science **133**(3465): 1702-1703.

Craig, H., Gordon, L. I. (1965). "Deuterium and oxygen 18 variations in the ocean and the marine atmosphere."

Crittenden, R., Andrew, A., LeFournour, M., Young, M., Middleton, H., Stockmann, R. (2007). "Determining the geographic origin of milk in Australasia using multi-element stable isotope ratio analysis." International Dairy Journal **17**(5): 421-428.

Crowley, B. E., Miller, J. H., Bataille, C. P. (2017). "Strontium isotopes ($87\text{Sr}/86\text{Sr}$) in terrestrial ecological and palaeoecological research: empirical efforts and recent advances in continental-scale models." Biological Reviews **92**(1): 43-59.

Cunningham, C., Scheuer, L., Black, S. (2016). Developmental juvenile osteology, Academic Press.

Curtis Jr, J. B., Stueber, A. M. (1973). "Sr/Sr ratios and total strontium concentrations in surface waters of the Scioto River drainage basin, Ohio." Department of Geology, Miami University, Oxford, Ohio.

D'Angela, D., Longinelli, A. (1990). "Oxygen isotopes in living mammal's bone phosphate: further results." Chemical Geology: Isotope Geoscience section **86**(1): 75-82.

Dahl, S., Allain, P., Marie, P., Mauras, Y., Boivin, G., Ammann, P., Tsouderos, Y., Delmas, P., Christiansen, C. (2001). "Incorporation and distribution of strontium in bone." Bone **28**(4): 446-453.

Danezis, G. P., Tsagkaris, A. S., Camin, F., Brusic, V., Georgiou, C. A. (2016). "Food authentication: Techniques, trends & emerging approaches." TrAC Trends in Analytical Chemistry **85**: 123-132.

Dansgaard, W. (1953). "The abundance of $\text{O}18$ in atmospheric water and water vapour." Tellus **5**(4): 461-469.

Dansgaard, W. (1954). "The $\text{O}18$ -abundance in fresh water." Geochimica et Cosmochimica Acta **6**(5-6): 241-260.

Dansgaard, W. (1964). "Stable isotopes in precipitation." Tellus **16**(4): 436-468.

Darling, W., Bath, A., Talbot, J. (2003). "The O and H stable isotope composition of freshwaters in the British Isles. 2, surface waters and groundwater." Hydrology and Earth System Sciences **7**: 183-195.

Darling, W. G., BATH, A. H., GIBSON, J. J., ROZANSKI, K. (2006). "Isotopes in water". Isotopes in palaeoenvironmental research, Springer: 1-66.

Dasch, E. J. (1969). "Strontium isotopes in weathering profiles, deep-sea sediments, and sedimentary rocks." Geochimica et Cosmochimica Acta **33**(12): 1521-1552.

Datta, P., Bhattacharya, S., Tyagi, S. (1996). "¹⁸O studies on recharge of phreatic aquifers and groundwater flow-paths of mixing in the Delhi area." Journal of Hydrology **176**(1-4): 25-36.

Daux, V., Lécuyer, C., Héran, M.-A., Amiot, R., Simon, L., Fourel, F., Martineau, F., Lynnerup, N., Reyher, H., Escarguel, G. (2008). "Oxygen isotope fractionation between human phosphate and water revisited." Journal of Human Evolution **55**(6): 1138-1147.

Davies, A., Tan, G., Broad, T. (1984). "Growth gradients in the skeleton of cattle, sheep and pigs." Anatomia, histologia, embryologia **13**(3): 222-230.

Dawson, T. E., Mambelli, S., Plamboeck, A. H., Templer, P. H., Tu, K. P. (2002). "Stable isotopes in plant ecology." Annual review of ecology and systematics **33**(1): 507-559.

Dean, M. (1987). "Growth layers and incremental markings in hard tissues; a review of the literature and some preliminary observations about enamel structure in *Paranthropus boisei*." Journal of Human Evolution **16**(2): 157-172.

DeNiro, M. J., Epstein, S. (1979). "Relationship between the oxygen isotope ratios of terrestrial plant cellulose, carbon dioxide, and water." Science **204**(4388): 51-53.

DePaolo, D. J., Ingram, B. L. (1985). "High-resolution stratigraphy with strontium isotopes." Science **227**(4689): 938-941.

Dettwyler, K. A., Fishman, C. (1992). "Infant feeding practices and growth." Annual Review of Anthropology **21**(1): 171-204.

Di Paola-Naranjo, R. D., Baroni, M. V., Podio, N. S., Rubinstein, H. R., Fabani, M. P., Badini, R. G., Inga, M., Ostera, H. A., Cagnoni, M., Gallegos, E. (2011). "Fingerprints for main varieties of Argentinean wines: terroir differentiation by inorganic, organic, and stable isotopic analyses coupled to chemometrics." Journal of agricultural and food chemistry **59**(14): 7854-7865.

Dijkstra, F. A., Van Breemen, N., Jongmans, A. G., Davies, G. R., Likens, G. E. (2003). "Calcium weathering in forested soils and the effect of different tree species." Biogeochemistry **62**(3): 253-275.

Dodd, M., Lauenroth, W., Welker, J. (1998). "Differential water resource use by herbaceous and woody plant life-forms in a shortgrass steppe community." Oecologia **117**(4): 504-512.

Dole, M., Lane, G., Rudd, D., Zaukelies, D. (1954). "Isotopic composition of atmospheric oxygen and nitrogen." Geochimica et Cosmochimica Acta **6**(2): 65-78.

Dolphin, G., Eve, I. (1963). "The metabolism of strontium in adult humans." Physics in Medicine & Biology **8**(2): 193.

Dongmann, G., Förstel, H., Wagener, K. (1972). "18 O-rich oxygen from land photosynthesis." Nature New Biology **240**(99): 127.

Dongmann, G., Nürnberg, H., Förstel, H., Wagener, K. (1974). "On the enrichment of H 2 18 O in the leaves of transpiring plants." Radiation and environmental biophysics **11**(1): 41-52.

Douglas, T. A., Blum, J. D., Guo, L., Keller, K., Gleason, J. D. (2013). "Hydrogeochemistry of seasonal flow regimes in the Chena River, a subarctic watershed draining discontinuous permafrost in interior Alaska (USA)." Chemical Geology **335**: 48-62.

Douglas, T. A., Chamberlain, C. P., Blum, J. D. (2002). "Land use and geologic controls on the major elemental and isotopic ($\delta^{15}\text{N}$ and $87\text{Sr}/86\text{Sr}$) geochemistry of the Connecticut River watershed, USA." Chemical Geology **189**(1-2): 19-34.

Drivelos, S. A., Georgiou, C. A. (2012). "Multi-element and multi-isotope-ratio analysis to determine the geographical origin of foods in the European Union." TrAC Trends in Analytical Chemistry **40**: 38-51.

Dunbar, J. (1982). "A study of the factors affecting the 180/160 ratio of the water of wine." Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung **174**(5): 355-359.

Dunbar, J., Wilson, A. (1983). "Oxygen and hydrogen isotopes in fruit and vegetable juices." Plant Physiology **72**(3): 725-727.

Duncan, A. W., Dorrell, C., Grompe, M. (2009). "Stem cells and liver regeneration." Gastroenterology **137**(2): 466-481.

Dupras, T. L., Tocheri, M. W. (2007). "Reconstructing infant weaning histories at Roman period Kellis, Egypt using stable isotope analysis of dentition." American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists **134**(1): 63-74.

Durante, C., Baschieri, C., Bertacchini, L., Bertelli, D., Cocchi, M., Marchetti, A., Manzini, D., Papotti, G., Sighinolfi, S. (2015). "An analytical approach to Sr isotope ratio determination in Lambrusco wines for geographical traceability purposes." Food Chemistry **173**: 557-563.

Durante, C., Baschieri, C., Bertacchini, L., Cocchi, M., Sighinolfi, S., Silvestri, M., Marchetti, A. (2013). "Geographical traceability based on $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ indicator: A first approach for PDO Lambrusco wines from Modena." Food Chemistry **141**(3): 2779-2787.

Dutton, A., Wilkinson, B. H., Welker, J. M., Bowen, G. J., Lohmann, K. C. (2005). "Spatial distribution and seasonal variation in $18\text{O}/16\text{O}$ of modern precipitation and river water across the conterminous USA." Hydrological Processes: An International Journal **19**(20): 4121-4146.

Edwards, T., Aravena, R., Fritz, P., Morgan, A. (1985). "Interpreting paleoclimate from 18O and 2H in plant cellulose: comparison with evidence from fossil insects and relict permafrost in southwestern Ontario." Canadian Journal of Earth Sciences **22**(11): 1720-1726.

Ehleringer, J., Dawson, T. (1992). "Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition." Plant, Cell & Environment **15**(9): 1073-1082.

Ehleringer, J. R., Bowen, G. J., Chesson, L. A., West, A. G., Podlesak, D. W., Cerling, T. E. (2008). "Hydrogen and oxygen isotope ratios in human hair are related to geography." Proceedings of the National Academy of Sciences **105**(8): 2788-2793.

Ehleringer, J. R., Thompson, A. H., Podlesak, D. W., Bowen, G. J., Chesson, L. A., Cerling, T. E., Park, T., Dostie, P., Schwarcz, H. (2010). "A framework for the incorporation of isotopes and isoscapes in geospatial forensic investigations". Isoscapes, Springer: 357-387.

Ehtesham, E., Hayman, A., Van Hale, R., Frew, R. (2015). "Influence of feed and water on the stable isotopic composition of dairy milk." International Dairy Journal **47**: 37-45.

Eisenberg, E., Gordan, G. S. (1961). "Skeletal dynamics in man measured by nonradioactive strontium." The Journal of clinical investigation **40**(10): 1809-1825.

Elderfield, H. (1986). "Strontium isotope stratigraphy." Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology **57**(1): 71-90.

Elias, R. W., Hirao, Y., Patterson, C. C. (1982). "The circumvention of the natural biopurification of calcium along nutrient pathways by atmospheric inputs of industrial lead." Geochimica et Cosmochimica Acta **46**(12): 2561-2580.

Elliott, J. C. (2002). "Calcium phosphate biominerals." Reviews in mineralogy and geochemistry **48**(1): 427-453.

Elliott, J. C. (2013). "Structure and chemistry of the apatites and other calcium orthophosphates". Elsevier.

Ellis, W., Melzer, A., Green, B., Newgrain, K., Hindell, M., Carrick, F. (1995). "Seasonal-Variation in Water Flux, Field Metabolic-Rate and Food-Consumption of Free-Ranging Koalas (*Phascolarctos-Cinereus*)."
Australian Journal of Zoology **43**(1): 59-68.

Emsley, J. (2011). "Nature's building blocks: an AZ guide to the elements." Oxford University Press.

Epstein, S. (1956). "Variations in the $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios of freshwater and ice." Natnl. Acad. Sc. Nucl. Science Series Report **19**: 20-28.

Epstein, S., Mayeda, T. (1953). "Variation of O^{18} content of waters from natural sources." Geochimica et Cosmochimica Acta **4**(5): 213-224.

Epstein, S., Thompson, P., Yapp, C. J. (1977). "Oxygen and hydrogen isotopic ratios in plant cellulose." Science **198**(4323): 1209-1215.

Epstein, S., Zeiri, L. (1988). "Oxygen and carbon isotopic compositions of gases respired by humans." Proceedings of the National Academy of Sciences **85**(6): 1727-1731.

Ericson, J. E. (1985). "Strontium isotope characterization in the study of prehistoric human ecology." Journal of Human Evolution **14**(5): 503-514.

Ericson, J. E. (1989). "Some problems and potentials of strontium isotope analysis for human and animal ecology". Stable isotopes in ecological research, Springer: 252-259.

Eriksen, E. F. (2010). "Cellular mechanisms of bone remodeling." Reviews in Endocrine and Metabolic Disorders **11**(4): 219-227.

Evans, J., Stoodley, N., Chenery, C. (2006). "A strontium and oxygen isotope assessment of a possible fourth century immigrant population in a Hampshire cemetery, southern England." Journal of archaeological science **33**(2): 265-272.

Evans, J. A., Montgomery, J., Wildman, G. (2009). "Isotope domain mapping of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ biosphere variation on the Isle of Skye, Scotland." Journal of the Geological Society **166**(4): 617-631.

Ezzo, J. A. (1994). "Putting the "chemistry" back into archaeological bone chemistry analysis: modeling potential paleodietary indicators." Journal of Anthropological Archaeology **13**(1): 1-34.

Ezzo, J. A., Johnson, C. M., Price, T. D. (1997). "Analytical perspectives on prehistoric migration: a case study from east-central Arizona." Journal of archaeological science **24**(5): 447-466.

Fahy, G., Deter, C., Pitfield, R., Miskiewicz, J., Mahoney, P. (2017). "Bone deep: Variation in stable isotope ratios and histomorphometric measurements of bone remodelling within adult humans." Journal of archaeological science **87**: 10-16.

Farris, F., Strain, B. (1978). "The effects of water-stress on leaf H_2^{18}O enrichment." Radiation and environmental biophysics **15**(2): 167-202.

Faure, G. (1977). "Principles of isotope geology". New York, John Wiley and Sons, Inc.

Faure, G., Mensing, T. M. (2005). "Isotopes: principles and applications". John Wiley & Sons Inc.

Faure, G., Powell, J. L. (2012). "Strontium isotope geology." Springer Science & Business Media.

Feng, X., Faiia, A. M., Posmentier, E. S. (2009). "Seasonality of isotopes in precipitation: A global perspective." Journal of Geophysical Research: Atmospheres **114**(D8).

Field, R. D. (2010). "Observed and modeled controls on precipitation $\delta^{18}\text{O}$ over Europe: From local temperature to the Northern Annular Mode." Journal of Geophysical Research: Atmospheres **115**(D12).

Fischler, F. (2013). „Physiologie und Pathologie der Leber nach ihrem heutigen Stande“. Springer.

Flockhart, D. T., Kyser, T. K., Chipley, D., Miller, N. G., Norris, D. R. (2015). "Experimental evidence shows no fractionation of strontium isotopes ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) among soil, plants, and herbivores: implications for tracking wildlife and forensic science." Isotopes in environmental and health studies **51**(3): 372-381.

Font, L., Nowell, G. M., Pearson, D. G., Ottley, C. J., Willis, S. G. (2007). "Sr isotope analysis of bird feathers by TIMS: a tool to trace bird migration paths and breeding sites." Journal of Analytical Atomic Spectrometry **22**(5): 513-522.

Font, L., van der Peijl, G., van Wetten, I., Vroon, P., van der Wagt, B., Davies, G. (2012). "Strontium and lead isotope ratios in human hair: investigating a potential tool for determining recent human geographical movements." Journal of Analytical Atomic Spectrometry **27**(5): 719-732.

Fontes, J. C., Yousfi, M., Allison, G. (1986). "Estimation of long-term, diffuse groundwater discharge in the northern Sahara using stable isotope profiles in soil water." Journal of Hydrology **86**(3-4): 315-327.

Förstel, H. (1978). "The enrichment of ^{18}O in leaf water under natural conditions." Radiation and environmental biophysics **15**(4): 323-344.

Förstel, H. (1978). "The enrichment of H_2^{18}O under field and under laboratory conditions." Proc. Third Int. Cong. on Stable Isot., Oak Brook.

Förstel, H. (1985). "Die natürliche Fraktionierung der stabilen Sauerstoff-Isotope als Indikator für Reinheit und Herkunft von Wein." Naturwissenschaften **72**(9): 449-455.

Förstel, H., Hützen, H. (1982). „ $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Verhältnis im Grundwasser der Bundesrepublik Deutschland.“ Zentralbibliothek der Kernforschungsanlage Jülich.

Förstel, H., Hützen, H. (1984). "Variation des Verhältnisses der stabilen Sauerstoff-Isotope im Grundwasser der Bundesrepublik Deutschland." Gas- und Wasserfach. Wasser, Abwasser **125**(1): 21-25.

Franke, B., Hadorn, R., Bosset, J., Gremaud, G., Kreuzer, M. (2008). "Is authentication of the geographic origin of poultry meat and dried beef improved by combining multiple trace element and oxygen isotope analysis?" Meat science **80**(3): 944-947.

Franke, B. M., Gremaud, G., Hadorn, R., Kreuzer, M. (2005). "Geographic origin of meat—elements of an analytical approach to its authentication." European Food Research and Technology **221**(3-4): 493-503.

Franke, B. M., Haldimann, M., Reimann, J., Baumer, B., Gremaud, G., Hadorn, R., Bosset, J.-O., Kreuzer, M. (2007). "Indications for the applicability of element signature analysis for the determination of the geographic origin of dried beef and poultry meat." European Food Research and Technology **225**(3-4): 501-509.

Franke, B. M., Koslitz, S., Micaux, F., Piantini, U., Maury, V., Pfammatter, E., Wunderli, S., Gremaud, G., Bosset, J.-O., Hadorn, R. (2008). "Tracing the geographic origin of poultry meat and dried beef with oxygen and strontium isotope ratios." European Food Research and Technology **226**(4): 761-769.

Fraser, I., Meier-Augenstein, W., Kalin, R. M. (2006). "The role of stable isotopes in human identification: a longitudinal study into the variability of isotopic signals in human hair and nails." Rapid Communications in Mass Spectrometry: An International Journal Devoted to the Rapid Dissemination of Up-to-the-Minute Research in Mass Spectrometry **20**(7): 1109-1116.

Frederickson, G., Criss, R. (1999). "Isotope hydrology and residence times of the unpounded Meramec River Basin, Missouri." Chemical Geology **157**(3-4): 303-317.

Frei, K. M., Frei, R. (2011). "The geographic distribution of strontium isotopes in Danish surface waters—A base for provenance studies in archaeology, hydrology and agriculture." Applied Geochemistry **26**(3): 326-340.

Frei, K. M., Frei, R., Mannering, U., Gleba, M., Nosch, M.-L., Lyngstrøm, H. (2009). "Provenance of ancient textiles—a pilot study evaluating the strontium isotope system in wool." Archaeometry **51**(2): 252-276.

Frémondeau, D., Cucchi, T., Casabianca, F., Ughetto-Monfrin, J., Horard-Herbin, M.-P., Balasse, M. (2012). "Seasonality of birth and diet of pigs from stable isotope analyses of tooth enamel ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$): a modern reference data set from Corsica, France." Journal of archaeological science **39**(7): 2023-2035.

Fricke, H. C., Clyde, W. C., O'Neil, J. R. (1998). "Intra-tooth variations in $\delta^{18}\text{O}$ (PO₄) of mammalian tooth enamel as a record of seasonal variations in continental climate variables." Geochimica et Cosmochimica Acta **62**(11): 1839-1850.

Friedman, I., O'Neil, J. R. (1977). "Data of geochemistry: Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest". US Government Printing Office.

Friedrich, A. B., Antranikian, G. (1996). "Keratin degradation by *Fervidobacterium pennavorans*, a novel thermophilic anaerobic species of the order Thermotogales." Appl. Environ. Microbiol. **62**(8): 2875-2882.

Fry, B. (2007). "Stable isotope ecology." Springer Science & Business Media.

Fullagar, P., Lemmon, R. E., Ragland, P. C. (1971). "Petrochemical and geochronological studies of plutonic rocks in the Southern Appalachians: I. The Salisbury pluton." Geological Society of America Bulletin **82**(2): 409-416.

Gan, K., Wong, S. C., Yong, J., Farquhar, G. (2003). "Evaluation of models of leaf water ^{18}O enrichment using measurements of spatial patterns of vein xylem water, leaf water and dry matter in maize leaves." Plant, Cell & Environment **26**(9): 1479-1495.

Gan, K. S., Wong, S. C., Yong, J. W. H., Farquhar, G. D. (2002). " ^{18}O spatial patterns of vein xylem water, leaf water, and dry matter in cotton leaves." Plant Physiology **130**(2): 1008-1021.

Gat, J. (1995). "Stable isotopes of fresh and saline lakes". Physics and chemistry of lakes, Springer: 139-165.

Gat, J. (2010). "Isotope hydrology: a study of the water cycle." World Scientific.

Gat, J., Bowser, C. (1991). "The heavy isotope enrichment of water in coupled evaporative systems". Stable Isotope Geochemistry: A Tribute to Samuel Epstein, The Geochemical Society St. Louis. **3**: 159-168.

Gat, J. R. (1980). "The isotopes of hydrogen and oxygen in precipitation". Handbook of environmental isotope geochemistry. Vol. 1.

Geo (23.05.2019). „Wie lang Nutztiere leben könnten - und wie alt sie tatsächlich werden“. GEO. <https://www.geo.de/natur/tierwelt/21383-rtkl-massentierhaltung-wie-lang-nutztiere-leben-koennten-und-wie-alt-sie>.

Gibson, J., Birks, S., Yi, Y. (2016). "Stable isotope mass balance of lakes: a contemporary perspective." Quaternary Science Reviews **131**: 316-328.

Gibson, J., Edwards, T. (2002). "Regional water balance trends and evaporation-transpiration partitioning from a stable isotope survey of lakes in northern Canada." Global Biogeochemical Cycles **16**(2): 10-11-10-14.

Gierth, M., Stelzer, R., Lehmann, H. (1998). "Endodermal Ca and Sr partitioning in needles of the European larch (*Larix decidua* (L.) Mill.)." Journal of plant physiology **152**(1): 25-30.

Gill, B. P. (1989). "Water use by pigs managed under various conditions of housing, feeding, and nutrition." University of Plymouth.

Goldstein, G., Sarmiento, G. (1987). "Water. Water relations of trees and grasses and their consequences for the structure of savanna vegetation." IUBS MONOGR. SER. 1987.

Gonfiantini, R. (1978). "Standards for stable isotope measurements in natural compounds." Nature **271**(5645): 534.

Gonfiantini, R. (1985). "On the isotopic composition of precipitation in tropical stations." Acta Amazonica **15**(1-2): 121-140.

Gonfiantini, R. (1986). "Environmental isotopes in lake studies." Handbook of environmental isotope geochemistry, the terrestrial environment **2**: 113-168.

Gonfiantini, R., Gratzu, S., Tongiorgi, E. (1965). "Oxygen isotopic composition of water in leaves." Isotopes and Radiation in Soil-Plant Nutrition Studies **405**: 410.

Gonfiantini, R., Roche, M.-A., Olivry, J.-C., Fontes, J.-C., Zuppi, G. M. (2001). "The altitude effect on the isotopic composition of tropical rains." Chemical Geology **181**(1-4): 147-167.

Gonzalez, A., Armenta, S., De La Guardia, M. (2009). "Trace-element composition and stable-isotope ratio for discrimination of foods with Protected Designation of Origin." TrAC Trends in Analytical Chemistry **28**(11): 1295-1311.

Gosz, J. R., Brookins, D. G., Moore, D. I. (1983). "Using strontium isotope ratios to estimate inputs to ecosystems." Bioscience **33**(1): 23-30.

Graustein, W. C. (1989). "87Sr/86Sr ratios measure the sources and flow of strontium in terrestrial ecosystems". Stable isotopes in ecological research, Springer: 491-512.

Graustein, W. C., Armstrong, R. L. (1983). "The use of strontium-87/strontium-86 ratios to measure atmospheric transport into forested watersheds." Science **219**(4582): 289-292.

Green, D. R., Green, G. M., Colman, A. S., Bidlack, F. B., Tafforeau, P., Smith, T. M. (2017). "Synchrotron imaging and Markov chain Monte Carlo reveal tooth mineralization patterns." PloS one **12**(10): e0186391.

Green, D. R., Olack, G., Colman, A. S. (2018). "Determinants of blood water $\delta^{18}\text{O}$ variation in a population of experimental sheep: Implications for paleoclimate reconstruction." Chemical Geology **485**: 32-43.

Greenfield, H. J. (1988). "Special studies: bone consumption by pigs in a contemporary Serbian village: implications for the interpretation of prehistoric faunal assemblages." Journal of Field Archaeology **15**(4): 473-479.

Gregg, S. A. (1988). "Foragers and farmers: population interaction and agricultural expansion in prehistoric Europe." University of Chicago Press.

Gregoricka, L. A. (2014). "Assessing life history from commingled assemblages: the biogeochemistry of inter-tooth variability in Bronze Age Arabia." Journal of archaeological science **47**: 10-21.

Greiner, M., Rodríguez-Navarro, A., Heinig, M., Mayer, K., Kocsis, B., Göhring, A., Toncala, A., Grupe, G., Schmah, W. (2019). "Bone incineration: An experimental study on mineral structure, colour and crystalline state." Journal of Archaeological Science: Reports **25**: 507-518.

Gretebeck, R. J., Schoeller, D. A., Socki, R. A., Davis-Street, J., Gibson, E. K., Schulz, L. O., Lane, H. W. (1997). "Adaptation of the doubly labeled water method for subjects consuming isotopically enriched water." Journal of Applied Physiology **82**(2): 563-570.

Grupe, G. (1998). "Archives of Childhood"—The Research Potential of Trace Element Analyses of Ancient Human Dental Enamel. Dental Anthropology, Springer: 337-347.

Grupe, G., Harbeck, M., McGlynn, G. C. (2015). „Rekonstruktion der Population“. Prähistorische Anthropologie, Springer: 405-427.

Grupe, G., Harbeck, M., McGlynn, G. C. (2015). „Stabile Isotope: Aussagemöglichkeiten und Grenzen“. Prähistorische Anthropologie, Springer: 429-477.

Grupe, G., Price, T. D., Schröter, P., Söllner, F., Johnson, C. M., Beard, B. L. (1997). "Mobility of Bell Beaker people revealed by strontium isotope ratios of tooth and bone: a study of southern Bavarian skeletal remains." Applied Geochemistry **12**(4): 517-525.

Grupe, G., von Carnap-Bornheim, C., Söllner, F. (2011). "Stable strontium isotope mapping for provenance studies in archaeology—different material, different signals." Bulletin de la Société Suisse d'Anthropologie **17**: 67-76.

Guyton, A. C., Hall, J. E. (1986). "Textbook of medical physiology." Saunders Philadelphia.

Habermehl, K. H. (1961). "Altersbestimmung bei Haustieren, Pelztieren und beim jagdbaren Wild." Parey.

Haggarty, P., McGaw, B., Franklin, M. (1988). "Measurement of fractionated water loss and CO₂ production using triply labelled water." Journal of Theoretical Biology **134**(3): 291-308.

Hajj, F., Poszwa, A., Bouchez, J., Guérol, F. (2017). "Radiogenic and "stable" strontium isotopes in provenance studies: A review and first results on archaeological wood from shipwrecks." Journal of Archaeological Science **86**: 24-49.

Halder, J., Terzer, S., Wassenaar, L., Araguás-Araguás, L., Aggarwal, P. (2015). "The Global Network of Isotopes in Rivers (GNIR): integration of water isotopes in watershed observation and riverine research." Hydrology and Earth System Sciences **19**(8): 3419-3431.

Hammond, J. (1932). "Pigs for pork and pigs for bacon." JR Agric. Soc. England **93**: 131-145.

Hare, P. E., Fogel, M. L., Stafford Jr, T. W., Mitchell, A. D., Hoering, T. C. (1991). "The isotopic composition of carbon and nitrogen in individual amino acids isolated from modern and fossil proteins." Journal of archaeological science **18**(3): 277-292.

Harrison, G., Raymond, W. (1955). "The estimation of trace amounts of barium or strontium in biological material by activation analysis." Journal of Nuclear Energy (1954) **1**(3-4): 290-298.

Hartsook, E., Hershberger, T. (1973). "Strontium–calcium discrimination during placental transfer and fetal uptake in rats: effect of gestation duration." Experimental Biology and Medicine **143**(2): 343-349.

Heaton, K., Kelly, S. D., Hoogewerff, J., Woolfe, M. (2008). "Verifying the geographical origin of beef: The application of multi-element isotope and trace element analysis." Food Chemistry **107**(1): 506-515.

Helliker, B. R., Ehleringer, J. R. (2000). "Establishing a grassland signature in veins: ^{18}O in the leaf water of C3 and C4 grasses." Proceedings of the National Academy of Sciences **97**(14): 7894-7898.

Herring, S. W. (1985). "The ontogeny of mammalian mastication." American Zoologist **25**(2): 339-350.

Hillson, S. (1986). "Teeth." Cambridge, University Press.

Hillson, S. (2005). "Teeth." Cambridge University Press.

Hobson, K. A. (1999). "Tracing origins and migration of wildlife using stable isotopes: a review." Oecologia **120**(3): 314-326.

Hodell, D. A., Quinn, R. L., Brenner, M., Kamenov, G. (2004). "Spatial variation of strontium isotopes ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) in the Maya region: a tool for tracking ancient human migration." Journal of archaeological science **31**(5): 585-601.

Hoefs, J. (2008). "Stable isotope geochemistry." Springer Science & Business Media.

Hogue, D., Pond, W., Comar, C., Alexander, L., Hardy, E. (1961). "Comparative Utilization of Dietary Calcium and Strontium-90 by Pigs and Sheep." Journal of animal science **20**(3): 514-517.

Holbach, B., Förstel, H., Otteneder, H., Hützen, H. (1994). "Das Verhältnis der Stabilisotopen ^{18}O und ^{16}O zur Beurteilung von Auslandswein." Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und-Forschung **198**(3): 223-229.

Holdsworth, G., Fogarasi, S., Krouse, H. (1991). "Variation of the stable isotopes of water with altitude in the Saint Elias Mountains of Canada." Journal of Geophysical Research: Atmospheres **96**(D4): 7483-7494.

Holland, H. D. (1984). "The chemical evolution of the atmosphere and oceans." Princeton University Press.

Höllriegel, V., München, H. (2011). "Strontium in the environment and possible human health effects." Elsevier.

Hölzl, S., Horn, P., Rossmann, A., Rummel, S. (2004). "Isotope-abundance ratios of light (bio) and heavy (geo) elements in biogenic tissues: methods and applications." Analytical and bioanalytical chemistry **378**(2): 270-272.

Hoogewerff, J., Papesch, W., Kralik, M., Berner, M., Vroon, P., Miesbauer, H., Gaber, O., Künzle, K.-H., Kleinjans, J. (2001). "The last domicile of the Iceman from Hauslabjoch: a geochemical approach using Sr, C and O isotopes and trace element signatures." Journal of archaeological science **28**(9): 983-989.

Hoppe, K. A. (2006). "Correlation between the oxygen isotope ratio of North American bison teeth and local waters: implication for paleoclimatic reconstructions." Earth and planetary science letters **244**(1-2): 408-417.

Hoppe, K. A., Koch, P. L., Carlson, R. W., Webb, S. D. (1999). "Tracking mammoths and mastodons: reconstruction of migratory behavior using strontium isotope ratios." Geology **27**(5): 439-442.

Horibe, Y., Shigehara, K., Takakuwa, Y. (1973). "Isotope separation factor of carbon dioxide-water system and isotopic composition of atmospheric oxygen." Journal of Geophysical Research **78**(15): 2625-2629.

Hosono, T., Nakano, T., Igeta, A., Tayasu, I., Tanaka, T., Yachi, S. (2007). "Impact of fertilizer on a small watershed of Lake Biwa: use of sulfur and strontium isotopes in environmental diagnosis." Science of the Total Environment **384**(1-3): 342-354.

Houderou, G., Kelly, S. D., Dennis, M. J. (1999). "Determination of the oxygen-18/oxygen-16 isotope ratios of sugar, citric acid and water from single strength orange juice." Rapid Communications in Mass Spectrometry **13**(13): 1257-1262.

Howland, M. R., Corr, L. T., Young, S. M., Jones, V., Jim, S., Van Der Merwe, N. J., Mitchell, A. D., Evershed, R. P. (2003). "Expression of the dietary isotope signal in the compound-specific $\delta^{13}\text{C}$ values of pig bone lipids and amino acids." International Journal of Osteoarchaeology **13**(1-2): 54-65.

Huertas, A. D., Iacumin, P., Stenni, B., Chillón, B. S., Longinelli, A. (1995). "Oxygen isotope variations of phosphate in mammalian bone and tooth enamel." Geochimica et Cosmochimica Acta **59**(20): 4299-4305.

Humphrey, L. T., Dean, M. C., Jeffries, T. E., Penn, M. (2008). "Unlocking evidence of early diet from tooth enamel." Proceedings of the National Academy of Sciences **105**(19): 6834-6839.

Hurst, R., Davis, T. (1981). "Strontium isotopes as tracers of airborne fly ash from coal-fired power plants." Environmental Geology **3**(6): 363-367.

Iacumin, P., Bocherens, H., Mariotti, A., Longinelli, A. (1996). "Oxygen isotope analyses of co-existing carbonate and phosphate in biogenic apatite: a way to monitor diagenetic alteration of bone phosphate?" Earth and planetary science letters **142**(1): 1-6.

Ingersoll, R., Wasserman, R. (1971). "Vitamin D₃-induced Calcium-binding Protein binding Characteristics, Conformational Effects, and other Properties." Journal of Biological Chemistry **246**(9): 2808-2814.

Ingraham, N. L., Caldwell, E. A., Verhagen, B. T. (1998). "Arid catchments". Isotope tracers in catchment hydrology, Elsevier: 435-465.

Jacob, H., Sonntag, C. (1991). "An 8-year record of the seasonal variation of ²H and ¹⁸O in atmospheric water vapour and precipitation at Heidelberg, Germany." Tellus B **43**(3): 291-300.

Janin, M., Medini, S., Técher, I. (2014). "Methods for PDO olive oils traceability: state of art and discussion about the possible contribution of strontium isotopic tool." European Food Research and Technology **239**(5): 745-754.

Jasechko, S., Gibson, J. J., Edwards, T. W. (2014). "Stable isotope mass balance of the Laurentian Great Lakes." Journal of Great Lakes Research **40**(2): 336-346.

Jeelani, G., Shah, R. A., Jacob, N., Deshpande, R. D. (2017). "Estimation of snow and glacier melt contribution to Liddar stream in a mountainous catchment, western Himalaya: an isotopic approach." Isotopes in environmental and health studies **53**(1): 18-35.

Johnsen, S. J., Dahl-Jensen, D., Dansgaard, W., Gundestrup, N. (1995). "Greenland palaeotemperatures derived from GRIP bore hole temperature and ice core isotope profiles." Tellus B: Chemical and Physical Meteorology **47**(5): 624-629.

Johnson, A., Armstrong, W., Singer, L. (1966). "Strontium incorporation into dental enamel." Science **153**(3742): 1396-1397.

Jones, M. D., Imbers, J. (2010). "Modeling Mediterranean lake isotope variability." Global and Planetary Change **71**(3-4): 193-200.

Jones, M. D., Leng, M. J., Roberts, C. N., Türkeş, M., Moyeed, R. (2005). "A coupled calibration and modelling approach to the understanding of dry-land lake oxygen isotope records." Journal of Paleolimnology **34**(3): 391-411.

Jørgensen, N. O., Morthorst, J., Holm, P. M. (1999). "Strontium-isotope studies of "brown water"(organic-rich groundwater) from Denmark." Hydrogeology Journal **7**(6): 533-539.

Jouzel, J., Hoffmann, G., Koster, R., Masson, V. (2000). "Water isotopes in precipitation:: data/model comparison for present-day and past climates." Quaternary Science Reviews **19**(1-5): 363-379.

Jowsey, J. (1971). "The internal remodeling of bones." The Biochemistry and Physiology of Bone III: Development and Growth. Academic Press, New York: 201-238.

- Kanayama, S., Yabuki, S., Yanagisawa, F., Motoyama, R. (2002). "The chemical and strontium isotope composition of atmospheric aerosols over Japan: the contribution of long-range-transported Asian dust (Kosa)." Atmospheric environment **36**(33): 5159-5175.
- Kawasaki, A., Oda, H., Hirata, T. (2002). "Determination of strontium isotope ratio of brown rice for estimating its provenance." Soil science and plant nutrition **48**(5): 635-640.
- Keller, K., Blum, J. D., Kling, G. W. (2007). "Geochemistry of soils and streams on surfaces of varying ages in arctic Alaska." Arctic, Antarctic, and Alpine Research **39**(1): 84-98.
- Kelly, S., Heaton, K., Hoogewerff, J. (2005). "Tracing the geographical origin of food: The application of multi-element and multi-isotope analysis." Trends in Food Science & Technology **16**(12): 555-567.
- Kempson, I. M., Skinner, W. M. (2012). "A comparison of washing methods for hair mineral analysis: Internal versus external effects." Biological trace element research **150**(1-3): 10-14.
- Kendall, C., Coplen, T. B. (2001). "Distribution of oxygen-18 and deuterium in river waters across the United States." Hydrological processes **15**(7): 1363-1393.
- Kern, Z., Kohán, B., Leuenberger, M. (2014). "Precipitation isoscape of high reliefs: interpolation scheme designed and tested for monthly resolved precipitation oxygen isotope records of an Alpine domain." Atmospheric chemistry and physics **14**(4): 1897-1907.
- Kirsanow, K., Tuross, N. (2011). "Oxygen and hydrogen isotopes in rodent tissues: Impact of diet, water and ontogeny." Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology **310**(1): 9-16.
- Klaus, J., Chun, K. P., Stumpp, C. (2015). "Temporal trends in $\delta^{18}\text{O}$ composition of precipitation in Germany: insights from time series modelling and trend analysis." Hydrological processes **29**(12): 2668-2680.
- Klaut, D. (in prep.). „Mobilität und soziale Dynamik in Südbayern und im Nordtiroler Inntal in der Urnenfelderzeit (13.-9. Jh. v. Chr.)“. München, Ludwig-Maximilians-Universität. Dissertation.
- Kleiber, M. (1961). "The fire of life. An introduction to animal energetics." The fire of life. An introduction to animal energetics. John Wiley & Sons, Inc., New York: London.
- Knudson, K. J., Stanish, C., Cerna, M. C. L., Faull, K. F., Tantaleán, H. (2016). "Intra-individual variability and strontium isotope measurements: A methodological study using $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ data from Pampa de los Gentiles, Chíncha Valley, Peru." Journal of Archaeological Science: Reports **5**: 590-597.
- Koch, P. L., Behrensmeyer, A. K., Tuross, N., Fogel, M. L. (1989). "Isotopic fidelity during bone weathering and burial." Geophys. Lab. Carnegie Inst., Washington **1990**: 105.

Koch, P. L., Halliday, A. N., Walter, L. M., Stearley, R. F., Huston, T. J., Smith, G. R. (1992). "Sr isotopic composition of hydroxyapatite from recent and fossil salmon: the record of lifetime migration and diagenesis." Earth and planetary science letters **108**(4): 277-287.

Koehler, G., Wassenaar, L. I., Hendry, M. J. (2000). "An automated technique for measuring δD and $\delta^{18}O$ values of porewater by direct CO_2 and H_2 equilibration." Analytical chemistry **72**(22): 5659-5664.

Koeniger, P., Marshall, J. D., Link, T., Mulch, A. (2011). "An inexpensive, fast, and reliable method for vacuum extraction of soil and plant water for stable isotope analyses by mass spectrometry." Rapid Communications in Mass Spectrometry **25**(20): 3041-3048.

Kohn, M. J. (1996). "Predicting animal $\delta^{18}O$: accounting for diet and physiological adaptation." Geochimica et Cosmochimica Acta **60**(23): 4811-4829.

Kohn, M. J., Cerling, T. E. (2002). "Stable isotope compositions of biological apatite." Reviews in mineralogy and geochemistry **48**(1): 455-488.

Kohn, M. J., Schoeninger, M. J., Valley, J. W. (1996). "Herbivore tooth oxygen isotope compositions: effects of diet and physiology." Geochimica et Cosmochimica Acta **60**(20): 3889-3896.

Kohn, M. J., Welker, J. M. (2005). "On the temperature correlation of $\delta^{18}O$ in modern precipitation." Earth and planetary science letters **231**(1-2): 87-96.

Kornexl, B. E., Werner, T., Roßmann, A., Schmidt, H.-L. (1997). "Measurement of stable isotope abundances in milk and milk ingredients—a possible tool for origin assignment and quality control." Zeitschrift für Lebensmitteluntersuchung und-Forschung A **205**(1): 19-24.

Kortelainen, N. M., Karhu, J. A. (2004). "Regional and seasonal trends in the oxygen and hydrogen isotope ratios of Finnish groundwaters: a key for mean annual precipitation." Journal of Hydrology **285**(1-4): 143-157.

Krabbenhoft, D. P., Bowser, C. J., Anderson, M. P., Valley, J. W. (1990). "Estimating groundwater exchange with lakes: 1. The stable isotope mass balance method." Water Resources Research **26**(10): 2445-2453.

Kreuzer-Martin, H. W., Lott, M. J., Dorigan, J., Ehleringer, J. R. (2003). "Microbe forensics: oxygen and hydrogen stable isotope ratios in *Bacillus subtilis* cells and spores." Proceedings of the National Academy of Sciences **100**(3): 815-819.

Kroopnick, P., Craig, H. (1972). "Atmospheric oxygen: isotopic composition and solubility fractionation." Science **175**(4017): 54-55.

Kulp, J. L., Schulert, A. R. (1962). "Strontium-90 in Man V: The concentration in the bones of children had been dropping, but recent tests will reverse the trend." Science **136**(3516): 619-632.

Kuzmuk, K. N., Schook, L. B. (2011). "Pigs as a model for biomedical sciences." The genetics of the pig **2**: 426-444.

Läderach, A., Sodemann, H. (2016). "A revised picture of the atmospheric moisture residence time." Geophysical Research Letters **43**(2): 924-933.

Laffoon, J. E., Ramos, R. R., Baik, L. C., Storde, Y. N., Lopez, M. R., Davies, G. R., Hofman, C. L. (2014). "Long-distance exchange in the precolonial Circum-Caribbean: A multi-isotope study of animal tooth pendants from Puerto Rico." Journal of Anthropological Archaeology **35**: 220-233.

Lane, G. A., Dole, M. (1956). "Fractionation of oxygen isotopes during respiration." Science **123**(3197): 574-576.

Langman, V., Maloiy, G., Schmidt-Nielsen, K., Schroter, R. (1979). "Nasal heat exchange in the giraffe and other large mammals." Respiration physiology **37**(3): 325-333.

Leaney, F., Osmond, C., Allison, G., Ziegler, H. (1985). "Hydrogen-isotope composition of leaf water in C 3 and C 4 plants: its relationship to the hydrogen-isotope composition of dry matter." Planta **164**(2): 215-220.

Lécuyer, C. (2004). "Oxygen isotope analysis of phosphate." Handbook of stable isotope analytical techniques **1**: 482-499.

Lécuyer, C., Amiot, R., Touzeau, A., Trotter, J. (2013). "Calibration of the phosphate $\delta^{18}\text{O}$ thermometer with carbonate–water oxygen isotope fractionation equations." Chemical Geology **347**: 217-226.

Lécuyer, C., Gardien, V., Rigaudier, T., Fourel, F., Martineau, F., Cros, A. (2009). "Oxygen isotope fractionation and equilibration kinetics between CO 2 and H 2 O as a function of salinity of aqueous solutions." Chemical Geology **264**(1): 122-126.

Lee-Thorp, J. A., Sealy, J. C., Van Der Merwe, N. J. (1989). "Stable carbon isotope ratio differences between bone collagen and bone apatite, and their relationship to diet." Journal of archaeological science **16**(6): 585-599.

Lee-Thorp, J. A. (2008). "On isotopes and old bones." Archaeometry **50**(6): 925-950.

Lehn, C., Graw, M. (2012). "Wie viel Regionalität steckt in Körpergewebe?" Rechtsmedizin **22**(2): 99-105.

Lehn, C., Graw, M. (2014). "Stabilisotopenanalysen an Körpergeweben von unbekannten Personen." Rechtsmedizin **24**(2): 129-143.

Lehn, C., Rossmann, A., Graw, M. (2015). "Provenancing of unidentified corpses by stable isotope techniques—presentation of case studies." Science & Justice **55**(1): 72-88.

Leiper, J. B., Pitsiladis, Y., Maughan, R. J. (2001). "Comparison of water turnover rates in men undertaking prolonged cycling exercise and sedentary men." International journal of sports medicine **22**(03): 181-185.

Lengfelder, F., Grupe, G., Stallauer, A., Huth, R., Söllner, F. (2019). "Modelling strontium isotopes in past biospheres—Assessment of bioavailable $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios in local archaeological vertebrates based on environmental signatures." Science of the Total Environment **648**: 236-252.

Levinson, A. A., Luz, B., Kolodny, Y. (1987). "Variations in oxygen isotopic compositions of human teeth and urinary stones." Applied Geochemistry **2**(4): 367-371.

Lewis, J., Pike, A., Coath, C., Evershed, R. (2017). "Strontium concentration, radiogenic ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) and stable ($\delta^{88}\text{Sr}$) strontium isotope systematics in a controlled feeding study." STAR: Science & Technology of Archaeological Research **3**(1): 45-57.

Leyden, J. J., Wassenaar, L. I., Hobson, K. A., Walker, E. G. (2006). "Stable hydrogen isotopes of bison bone collagen as a proxy for Holocene climate on the Northern Great Plains." Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology **239**(1-2): 87-99.

Libby, W. F., Berger, R., Mead, J. F., Alexander, G. V., Ross, J. F. (1964). "Replacement rates for human tissue from atmospheric radiocarbon." Science **146**(3648): 1170-1172.

Lifson, N., Gordon, G. B., Visscher, M., Nier, A. (1949). "The fate of utilized molecular oxygen and the source of the oxygen of respiratory carbon dioxide, studied with the aid of heavy oxygen." J Biol Chem **180**(2): 803-811.

Lifson, N., McClintock, R. (1966). "Theory of use of the turnover rates of body water for measuring energy and material balance." Journal of Theoretical Biology **12**(1): 46-74.

Lightfoot, E., O'Connell, T. C. (2016). "On the use of biomineral oxygen isotope data to identify human migrants in the archaeological record: intra-sample variation, statistical methods and geographical considerations." PloS one **11**(4): e0153850.

Likins, R., McCann, H., Posner, A., Scott, D. (1960). "Comparative fixation of calcium and strontium by synthetic hydroxyapatite." Journal of Biological Chemistry **235**(7): 2152-2156.

Lin, G., Rau, Y., Chen, Y., Chou, C., Fu, W. (2003). "Measurements of δD and $\delta^{18}\text{O}$ stable isotope ratios in milk." Journal of food science **68**(7): 2192-2195.

Liu, Z., Tian, L., Chai, X., Yao, T. (2008). "A model-based determination of spatial variation of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ over China." Chemical Geology **249**(1-2): 203-212.

Longinelli, A. (1973). "Preliminary oxygen-isotope measurements of phosphate from mammal teeth and bones". Colloq. Int. CNRS.

Longinelli, A. (1984). "Oxygen isotopes in mammal bone phosphate: a new tool for paleohydrological and paleoclimatological research?" Geochimica et Cosmochimica Acta **48**(2): 385-390.

Longinelli, A., Nuti, S. (1973). "Revised phosphate-water isotopic temperature scale." Earth and planetary science letters **19**(3): 373-376.

Longinelli, A., Padalino, A. P. (1980). "Oxygen isotopic composition of water from mammal blood: first results." Eur J Mass Spectrom Biochem Med Environ Res **1**: 135-139.

Longinelli, A., Peretti, P. (1983). "Oxygen isotopic composition of mammal bones as a possible tool for palaeoclimatic studies. First results". Palaeoclimates and palaeowaters: A collection of environmental isotope studies.

Lough, S., Rivera, J., Comar, C. (1963). "Retention of strontium, calcium, and phosphorus in human infants." Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine **112**(3): 631-636.

Loutit, J. (1961). "Calcium and strontium turnover in man." Irish Journal of Medical Science (1926-1967) **36**(7): 283.

Lutter, C. (1992). "Recommended length of exclusive breast-feeding age of introduction of complementary foods and the weanling dilemma." Diarrhoeal Disease Control Programme. World Health Organization.

Luykx, D. M., Van Ruth, S. M. (2008). "An overview of analytical methods for determining the geographical origin of food products." Food Chemistry **107**(2): 897-911.

Luz, B., Barkan, E., Yam, R., Shemesh, A. (2009). "Fractionation of oxygen and hydrogen isotopes in evaporating water." Geochimica et Cosmochimica Acta **73**(22): 6697-6703.

Luz, B., Cormie, A. B., Schwarcz, H. P. (1990). "Oxygen isotope variations in phosphate of deer bones." Geochimica et Cosmochimica Acta **54**(6): 1723-1728.

Luz, B., Kolodny, Y. (1985). "Oxygen isotope variations in phosphate of biogenic apatites, IV. Mammal teeth and bones." Earth and planetary science letters **75**(1): 29-36.

Luz, B., Kolodny, Y., Horowitz, M. (1984). "Fractionation of oxygen isotopes between mammalian bone-phosphate and environmental drinking water." Geochimica et Cosmochimica Acta **48**(8): 1689-1693.

Lynn Ingram, B., Weber, P. K. (1999). "Salmon origin in California's Sacramento–San Joaquin river system as determined by otolith strontium isotopic composition." Geology **27**(9): 851-854.

MacDonald, N., Noyes, P., Lorick, P. (1956). "Discrimination of calcium and strontium by the kidney." American Journal of Physiology-Legacy Content **188**(1): 131-136.

- Macko, S. A., Engel, M. H., Andrusevich, V., Lubec, G., O'Connell, T. C., Hedges, R. E. (1999). "Documenting the diet in ancient human populations through stable isotope analysis of hair." Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences **354**(1379): 65-76.
- Macleod, M. (1976). "⁴⁷Ca and ⁸⁵Sr absorption and excretion compared in normal controls." Journal of the Royal Naval Medical Service **62**(1): 17.
- Mainzer, B. (2010). „Strontium-, Barium-, Cadmium-, Kupfer-, Zink-, Mangan-, Chrom- und Antimonkonzentrationen in Leber, Nierenrinde und Nierenmark der Spezies Katze, Hund und Pferd in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht“. Freie Universität Berlin. Dissertation.
- Makarewicz, C. A., Sealy, J. (2015). "Dietary reconstruction, mobility, and the analysis of ancient skeletal tissues: expanding the prospects of stable isotope research in archaeology." Journal of archaeological science **56**: 146-158.
- Malagelada, J.-R., Longstreth, G., Summerskill, W., Go, V. (1976). "Measurement of gastric functions during digestion of ordinary solid meals in man." Gastroenterology **70**(2): 203-210.
- Manolagas, S. C. (2000). "Birth and death of bone cells: basic regulatory mechanisms and implications for the pathogenesis and treatment of osteoporosis." Endocrine reviews **21**(2): 115-137.
- Marchionni, S., Braschi, E., Tommasini, S., Bollati, A., Cifelli, F., Mulinacci, N., Mattei, M., Conticelli, S. (2013). "High-precision ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr analyses in wines and their use as a geological fingerprint for tracing geographic provenance." Journal of agricultural and food chemistry **61**(28): 6822-6831.
- Martin, C., Bentaleb, I., Kaandorp, R., Iacumin, P., Chatri, K. (2008). "Intra-tooth study of modern rhinoceros enamel $\delta^{18}\text{O}$: Is the difference between phosphate and carbonate $\delta^{18}\text{O}$ a sound diagenetic test?" Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology **266**(3-4): 183-189.
- Martin, C. E., McCulloch, M. T. (1999). "Nd-Sr isotopic and trace element geochemistry of river sediments and soils in a fertilized catchment, New South Wales, Australia." Geochimica et Cosmochimica Acta **63**(2): 287-305.
- Martin, R. B., Burr, D. B. (1989). "Structure, function, and adaptation of compact bone." Raven Pr.
- Martin, R. B., Burr, D. B., Sharkey, N. A., Fyhrie, D. P. (1998). "Skeletal tissue mechanics." Springer.
- Martin, T. J., Seeman, E. (2008). "Bone remodelling: its local regulation and the emergence of bone fragility." Best practice & research Clinical endocrinology & metabolism **22**(5): 701-722.
- Martinelli, L. A., Victoria, R. L., Sternberg, L. S. L., Ribeiro, A., Moreira, M. Z. (1996). "Using stable isotopes to determine sources of evaporated water to the atmosphere in the Amazon basin." Journal of Hydrology **183**(3-4): 191-204.

Maurer, A.-F., Galer, S. J., Knipper, C., Beierlein, L., Nunn, E. V., Peters, D., Tütken, T., Alt, K. W., Schöne, B. R. (2012). "Bioavailable $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in different environmental samples—Effects of anthropogenic contamination and implications for isoscapes in past migration studies." Science of the Total Environment **433**: 216-229.

Mayr, C., Grupe, G., Toncal, A., Lihl, C. M. (2016). "Linking Oxygen Isotopes of Animal-Bone Phosphate with Altimetry: Results from Archaeological Finds from a Transect in the Alps". Isotopic Landscapes in Bioarchaeology, Springer: 157-172.

McArthur, J. M., Howarth, R., Bailey, T. (2001). "Strontium isotope stratigraphy: LOWESS version 3: best fit to the marine Sr-isotope curve for 0–509 Ma and accompanying look-up table for deriving numerical age." The Journal of Geology **109**(2): 155-170.

McCance, R., Ford, E., Brown, W. (1961). "Severe undernutrition in growing and adult animals: 7. Development of the skull, jaws and teeth in pigs." British Journal of Nutrition **15**(2): 213-224.

McClellan, R. (1964). "Calcium–strontium discrimination in miniature pigs as related to age." Nature **202**(4927): 104.

McCullagh, J. S., Tripp, J. A., Hedges, R. E. (2005). "Carbon isotope analysis of bulk keratin and single amino acids from British and North American hair." Rapid Communications in Mass Spectrometry: An International Journal Devoted to the Rapid Dissemination of Up-to-the-Minute Research in Mass Spectrometry **19**(22): 3227-3231.

McManus, E., Montgomery, J., Evans, J., Lamb, A., Brettell, R., Jelsma, J. (2013). "'To the land or to the sea': diet and mobility in early medieval Frisia." The Journal of Island and Coastal Archaeology **8**(2): 255-277.

McNab, B. K. (1988). "Complications inherent in scaling the basal rate of metabolism in mammals." The Quarterly Review of Biology **63**(1): 25-54.

McNamara, L. M., Prendergast, P. J. (2007). "Bone remodelling algorithms incorporating both strain and microdamage stimuli." Journal of biomechanics **40**(6): 1381-1391.

Medini, S., Janin, M., Verdoux, P., Techer, I. (2015). "Methodological development for $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ measurement in olive oil and preliminary discussion of its use for geographical traceability of PDO Nîmes (France)." Food Chemistry **171**: 78-83.

Meghji, S. (1992). "Bone remodelling." British dental journal **172**(6): 235.

Meier-Augenstein, W., Fraser, I. (2008). "Forensic isotope analysis leads to identification of a mutilated murder victim." Science & Justice **48**(3): 153-159.

Meier, C., Knoche, M., Merz, R., Weise, S. M. (2013). "Stable isotopes in river waters in the Tajik Pamirs: regional and temporal characteristics." Isotopes in environmental and health studies **49**(4): 542-554.

Meiggs, D. C. (2007). "Visualizing the seasonal round: a theoretical experiment with strontium isotope profiles in ovicaprine teeth." Anthropozoologica **42**(2): 107-128.

Menczel, J., Mor, E. (1972). "The effect of thyrocalcitonin on calcium binding protein and on strontium binding protein". Proceedings of the 2nd International Symposium on Strontium Metabolism, Glasgow, Scotland.

Menzel, RG, and Heald, WR (1959) "Strontium and calcium contents of crop plants in relation to exchangeable strontium and calcium in the soil". Proc. Soil Sci. Soc. Am.

Merlivat, L. (1978). "Molecular diffusivities of H [sub 2][sup 16] O, HD [sup 16] O, and H [sub 2][sup 18] O in gases." The Journal of Chemical Physics **69**(6): 2864.

Michal, G., Schomburg, D. (2012). "Biochemical pathways: an atlas of biochemistry and molecular biology." John Wiley & Sons.

Michener, R., Lajtha, K. (2008). "Stable isotopes in ecology and environmental science." John Wiley & Sons.

Miller, E. K., Blum, J. D., Friedland, A. J. (1993). "Determination of soil exchangeable-cation loss and weathering rates using Sr isotopes." Nature **362**(6419): 438-441.

Minami, M., Suzuki, K. (2018). "87Sr/86Sr compositional linkage between geological and biological materials: A case study from the Toyota granite region of Japan." Chemical Geology **484**: 224-232.

Minniti, C., Valenzuela-Lamas, S., Evans, J., Albarella, U. (2014). "Widening the market. Strontium isotope analysis on cattle teeth from Owslebury (Hampshire, UK) highlights changes in livestock supply between the Iron Age and the Roman period." Journal of archaeological science **42**: 305-314.

Montel, G., Bonel, G., Heughebaert, J., Trombe, J., Rey, C. (1981). "New concepts in the composition, crystallization and growth of the mineral component of calcified tissues." Journal of Crystal Growth **53**(1): 74-99.

Montgomery, J. (2010). "Passports from the past: Investigating human dispersals using strontium isotope analysis of tooth enamel." Annals of human biology **37**(3): 325-346.

Montgomery, J., Evans, J. A., Cooper, R. E. (2007). "Resolving archaeological populations with Sr-isotope mixing models." Applied Geochemistry **22**(7): 1502-1514.

Montgomery, J., Evans, J. A., Wildman, G. (2006). "87Sr/86Sr isotope composition of bottled British mineral waters for environmental and forensic purposes." Applied Geochemistry **21**(10): 1626-1634.

Moore, M., Kuang, Z., Blossey, P. (2014). "A moisture budget perspective of the amount effect." Geophysical Research Letters **41**(4): 1329-1335.

Moser, H., Stichler, W. (1971). "Application of deuterium and oxygen-18 content measurements in hydrological investigations." Geol. Bavarica **64**: 7-35.

Mroz, Z., Jongbloed, A. W., Lenis, N. P., Vreman, K. (1995). "Water in pig nutrition: physiology, allowances and environmental implications." Nutrition research reviews **8**(1): 137-164.

Müller, S., Stumpp, C., Sørensen, J. H., Jessen, S. (2017). "Spatiotemporal variation of stable isotopic composition in precipitation: Post-condensational effects in a humid area." Hydrological processes **31**(18): 3146-3159.

Murphy, R. C., Clay, K. L. (1979). "Synthesis and back exchange of ^{18}O labeled amino acids for use as internal standards with mass spectrometry." Biomedical mass spectrometry **6**(7): 309-314.

Musgrove, M., Banner, J. L. (1993). "Regional ground-water mixing and the origin of saline fluids: Midcontinent, United States." Science **259**(5103): 1877-1882.

Nagy, K. (1989). "Doubly-labeled water studies of vertebrate physiological ecology". Stable isotopes in ecological research, Springer: 270-287.

Nagy, K. A. (1980). "CO₂ production in animals: analysis of potential errors in the doubly labeled water method." American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology **238**(5): R466-R473.

Nagy, K. A., Costa, D. P. (1980). "Water flux in animals: analysis of potential errors in the tritiated water method." American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology **238**(5): R454-R465.

Nagy, K. A., Peterson, C. C. (1988). "Scaling of water flux rate in animals". University of California Publications in Zoology. University of California Press.

Nakashita, R., Suzuki, Y., Akamatsu, F., Iizumi, Y., Korenaga, T., Chikaraishi, Y. (2008). "Stable carbon, nitrogen, and oxygen isotope analysis as a potential tool for verifying geographical origin of beef." Analytica Chimica Acta **617**(1-2): 148-152.

Négrel, P., Deschamps, P. (1996). "Natural and anthropogenic budgets of a small watershed in the Massif Central (France): chemical and strontium isotopic characterization of water and sediments." Aquatic Geochemistry **2**(1): 1-27.

Nielsen, S. P. (2004). "The biological role of strontium." Bone **35**(3): 583-588.

O'Brien, D. M., Wooller, M. J. (2007). "Tracking human travel using stable oxygen and hydrogen isotope analyses of hair and urine." Rapid Communications in Mass Spectrometry: An International Journal Devoted to the Rapid Dissemination of Up-to-the-Minute Research in Mass Spectrometry **21**(15): 2422-2430.

O'Grady, S. P., Valenzuela, L. O., Remien, C. H., Enright, L. E., Jorgensen, M. J., Kaplan, J. R., Wagner, J. D., Cerling, T. E., Ehleringer, J. R. (2012). "Hydrogen and oxygen isotope ratios in body water and hair: modeling isotope dynamics in nonhuman primates." American journal of primatology **74**(7): 651-660.

O'Neil, J. R., Roe, L. J., Reinhard, E., Blake, R. (1994). "A rapid and precise method of oxygen isotope analysis of biogenic phosphate." Israel Journal of Earth Sciences **43**(3-4): 203-212.

Ogée, J., Cuntz, M., Peylin, P., Bariac, T. (2007). "Non-steady-state, non-uniform transpiration rate and leaf anatomy effects on the progressive stable isotope enrichment of leaf water along monocot leaves." Plant, Cell & Environment **30**(4): 367-387.

Pan, Y., Fleet, M. E. (2002). "Compositions of the apatite-group minerals: substitution mechanisms and controlling factors." Reviews in mineralogy and geochemistry **48**(1): 13-49.

Pappenberger, E. (2014). „Vergleich der Körperzusammensetzung konventioneller und alternativer Masthybriden mittels Dualenergie- γ -absorptiometrie und Magnetresonanztomographie“. Ludwig-Maximilians-Universität München, Dissertation.

Pate, D., Hutton, J. (1988). "The use of soil chemistry data to address post-mortem diagenesis in bone mineral." Journal of Archaeological Science **15**(6): 729-739.

Paternoster, M., Liotta, M., Favara, R. (2008). "Stable isotope ratios in meteoric recharge and groundwater at Mt. Vulture volcano, southern Italy." Journal of Hydrology **348**(1-2): 87-97.

Pearson, O. M., Lieberman, D. E. (2004). "The aging of Wolff's "law": ontogeny and responses to mechanical loading in cortical bone." American journal of physical anthropology **125**(S39): 63-99.

Pederzani, S., Britton, K. (2018). "Oxygen isotopes in bioarchaeology: principles and applications, challenges and opportunities." Earth-Science Reviews **188**(1): 77-107.

Pellegrini, M., Lee-Thorp, J. A., Donahue, R. E. (2011). "Exploring the variation of the $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ and $\delta^{18}\text{O}_\text{c}$ relationship in enamel increments." Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology **310**(1): 71-83.

Perini, M., Camin, F., Bontempo, L., Rossmann, A., Piasentier, E. (2009). "Multielement (H, C, N, O, S) stable isotope characteristics of lamb meat from different Italian regions." Rapid Communications in Mass Spectrometry: An International Journal Devoted to the Rapid Dissemination of Up-to-the-Minute Research in Mass Spectrometry **23**(16): 2573-2585.

Pett-Ridge, J. C., Derry, L. A., Barrows, J. K. (2009). "Ca/Sr and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios as tracers of Ca and Sr cycling in the Rio Icacos watershed, Luquillo Mountains, Puerto Rico." Chemical Geology **267**(1-2): 32-45.

Pflug, K., Schuster, K.-D. (1989). "Fractionation of oxygen isotopes due to equilibration of oxygen with hemoglobin". Oxygen Transport to Tissue XI, Springer: 407-411.

Pflug, K., Schuster, K., Pichotka, J., Forstel, H. (1979). „Fractionation effects of oxygen isotopes in mammals”. Stable isotopes: Proceedings of the third international conference, Academic Press San Diego.

Pham, S. V., Leavitt, P. R., McGowan, S., Wissel, B., Wassenaar, L. I. (2009). "Spatial and temporal variability of prairie lake hydrology as revealed using stable isotopes of hydrogen and oxygen." Limnology and Oceanography **54**(1): 101-118.

Phillips, D. L., Eldridge, P. M. (2006). "Estimating the timing of diet shifts using stable isotopes." Oecologia **147**(2): 195-203.

Philpotts, J. A., Schnetzler, C. (1970). "Phenocryst-matrix partition coefficients for K, Rb, Sr and Ba, with applications to anorthosite and basalt genesis." Geochimica et Cosmochimica Acta **34**(3): 307-322.

Pillonel, L., Badertscher, R., Froidevaux, P., Haberhauer, G., Hölzl, S., Horn, P., Jakob, A., Pfammatter, E., Piantini, U., Rossmann, A. (2003). "Stable isotope ratios, major, trace and radioactive elements in emmental cheeses of different origins." LWT-Food Science and Technology **36**(6): 615-623.

Pin, C., Joannon, S., Bosq, C., Le Fèvre, B., Gauthier, P.-J. (2003). "Precise determination of Rb, Sr, Ba, and Pb in geological materials by isotope dilution and ICP-quadrupole mass spectrometry following selective separation of the analytes." Journal of Analytical Atomic Spectrometry **18**(2): 135-141.

Poage, M. A., Chamberlain, C. P. (2001). "Empirical relationships between elevation and the stable isotope composition of precipitation and surface waters: considerations for studies of paleoelevation change." American Journal of Science **301**(1): 1-15.

Podlesak, D. W., Torregrossa, A.-M., Ehleringer, J. R., Dearing, M. D., Passey, B. H., Cerling, T. E. (2008). "Turnover of oxygen and hydrogen isotopes in the body water, CO₂, hair, and enamel of a small mammal." Geochimica et Cosmochimica Acta **72**(1): 19-35.

Pollard, A., Pellegrini, M., Lee-Thorp, J. (2011). "Technical note: Some observations on the conversion of dental enamel $\delta^{18}\text{O}_{\text{p}}$ values to $\delta^{18}\text{O}_{\text{w}}$ to determine human mobility." American journal of physical anthropology **145**(3): 499-504.

Posmentier, E. S., Feng, X., Zhao, M. (2004). "Seasonal variations of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ in eastern Asia." Journal of Geophysical Research: Atmospheres **109**(D23).

Poszwa, A., Dambrine, E., Ferry, B., Pollier, B., Loubet, M. (2002). "Do deep tree roots provide nutrients to the tropical rainforest?" Biogeochemistry **60**(1): 97-118.

Poszwa, A., Ferry, B., Dambrine, E., Pollier, B., Wickman, T., Loubet, M., Bishop, K. (2004). "Variations of bioavailable Sr concentration and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio in boreal forest ecosystems." Biogeochemistry **67**(1): 1-20.

Price, T., Wahl, J., Knipper, C., Burger-Heinrich, E., Kurz, G., Bentley, R. (2003). "Das bandkeramische Gräberfeld von Stuttgart-Mühlhausen, Anthropologische Untersuchungen und chemische Analysen." Fundberichte aus Baden-Württemberg **27**: 23-58.

Price, T. D. (1989). "The chemistry of prehistoric human bone." CUP Archive.

Price, T. D., Burton, J. H., Bentley, R. A. (2002). "The characterization of biologically available strontium isotope ratios for the study of prehistoric migration." Archaeometry **44**(1): 117-135.

Price, T. D., Knipper, C., Grupe, G., Smrcka, V. (2004). "Strontium isotopes and prehistoric human migration: the Bell Beaker period in central Europe." European journal of archaeology **7**(1): 9-40.

Price, T. D., Nakamura, S., Suzuki, S., Burton, J. H., Tiesler, V. (2014). "New isotope data on Maya mobility and enclaves at Classic Copan, Honduras." Journal of Anthropological Archaeology **36**: 32-47.

Primrose, S., Woolfe, M., Rollinson, S. (2010). "Food forensics: methods for determining the authenticity of foodstuffs." Trends in Food Science & Technology **21**(12): 582-590.

Probst, A., El Gh'mari, A., Aubert, D., Fritz, B., McNutt, R. (2000). "Strontium as a tracer of weathering processes in a silicate catchment polluted by acid atmospheric inputs, Strengbach, France." Chemical Geology **170**(1-4): 203-219.

Prowse, T. L., Schwarcz, H. P., Garnsey, P., Knyf, M., Macchiarelli, R., Bondioli, L. (2007). "Isotopic evidence for age-related immigration to imperial Rome." American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists **132**(4): 510-519.

Pucéat, E., Joachimski, M. M., Bouilloux, A., Monna, F., Bonin, A., Motreuil, S., Morinière, P., Hénard, S., Mourin, J., Dera, G. (2010). "Revised phosphate–water fractionation equation reassessing paleotemperatures derived from biogenic apatite." Earth and planetary science letters **298**(1-2): 135-142.

Ramesh, R., Sarin, M. (1992). "Stable isotope study of the Ganga (Ganges) river system." Journal of Hydrology **139**(1-4): 49-62.

Rank, D., Papesch, W., Heiss, G., Tesch, R. (2012). "Environmental isotope ratios of river water in the Danube basin." Monitoring Isotopes in Rivers: Creation of the Global Network of Isotopes in Rivers (GNIR): 13-40.

Rank, D., Wyhlidal, S., Schott, K., Weigand, S., Oblin, A. (2018). "Temporal and spatial distribution of isotopes in river water in Central Europe: 50 years experience with the Austrian network of isotopes in rivers." Isotopes in environmental and health studies **54**(2): 115-136.

Reddy, M. M., Schuster, P., Kendall, C., Reddy, M. B. (2006). "Characterization of surface and ground water $\delta^{18}\text{O}$ seasonal variation and its use for estimating groundwater residence times." Hydrological Processes: An International Journal **20**(8): 1753-1772.

Rehnberg, G. L., Strong, A. B., Porter, C. R., Carter, M. W. (1969). "Levels of stable strontium in milk and the total diet." Environmental science & technology **3**(2): 171-173.

Reichle, D. E., Dunaway, P. B., Nelson, D. J. (1970). "Turnover and concentration of radionuclides in food chains." Nucl. Safety **11**: 43-55 (Jan-Feb 1970).

Reid, L. M., O'donnell, C. P., Downey, G. (2006). "Recent technological advances for the determination of food authenticity." Trends in Food Science & Technology **17**(7): 344-353.

Revesz, K. M., Buck, B., Coplen, T. B. (2012). "Determination of the $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of soil water and water in plant matter." RSIL lab code 1700, US Geological Survey.

Risi, C., Bony, S., Vimeux, F. (2008). "Influence of convective processes on the isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$ and δD) of precipitation and water vapor in the tropics: 2. Physical interpretation of the amount effect." Journal of Geophysical Research: Atmospheres **113**(D19).

Ritz, P., Gachon, P., Garel, J.-P., Bonnefoy, J.-C., Coulon, J.-B., Renou, J.-P. (2005). "Milk characterization: effect of the breed." Food Chemistry **91**(3): 521-523.

Roberts, S. B., Coward, W., Ewing, G., Savage, J., Cole, T., Lucas, A. (1988). "Effect of weaning on accuracy of doubly labeled water method in infants." American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology **254**(4): R622-R627.

Rock, L. (2012). "The use of stable isotope techniques in egg authentication schemes: a review." Trends in Food Science & Technology **28**(2): 62-68.

Roden, J. S., Lin, G., Ehleringer, J. R. (2000). "A mechanistic model for interpretation of hydrogen and oxygen isotope ratios in tree-ring cellulose." Geochimica et Cosmochimica Acta **64**(1): 21-35.

Rolett, B. V., Chiu, M.-y. (1994). "Age estimation of prehistoric pigs (*Sus scrofa*) by molar eruption and attrition." Journal of archaeological science **21**(3): 377-386.

Rosenthal, F. (2013). „Krankheiten der Leber und der Gallenwege: eine Darstellung für die Praxis.“ Springer-Verlag.

Rosenthal, H. L. (1981). "Content of stable strontium in man and animal biota". Handbook of stable strontium, Springer: 503-514.

Rossipal, E., Krachler, M. (1998). "Pattern of trace elements in human milk during the course of lactation." Nutrition research **18**(1): 11-24.

Rossmann, A. (2001). "Determination of stable isotope ratios in food analysis." Food reviews international **17**(3): 347-381.

Rossmann, A., Haberhauer, G., Hölzl, S., Horn, P., Pichlmayer, F., Voerkelius, S. (2000). "The potential of multielement stable isotope analysis for regional origin assignment of butter." European Food Research and Technology **211**(1): 32-40.

Rossmann, A., Reniero, F., Moussa, I., Schmidt, H.-L., Versini, G., Merle, M. (1999). "Stable oxygen isotope content of water of EU data-bank wines from Italy, France and Germany." Zeitschrift für Lebensmitteluntersuchung und-Forschung A **208**(5-6): 400-407.

Rozanski, K. (1985). "Deuterium and oxygen-18 in European groundwaters—links to atmospheric circulation in the past." Chemical Geology: Isotope Geoscience section **52**(3-4): 349-363.

Rozanski, K., Araguás-Araguás, L., Gonfiantini, R. (1992). "Relation between long-term trends of oxygen-18 isotope composition of precipitation and climate." Science **258**(5084): 981-985.

Rozanski, K., Araguás-Araguás, L., Gonfiantini, R. (1993). "Isotopic patterns in modern global precipitation." Climate change in continental isotopic records: 1-36.

Rubenstein, D. R., Hobson, K. A. (2004). "From birds to butterflies: animal movement patterns and stable isotopes." Trends in ecology & evolution **19**(5): 256-263.

Rucklidge, G. J., Milne, G., McGaw, B. A., Milne, E., Robins, S. P. (1992). "Turnover rates of different collagen types measured by isotope ratio mass spectrometry." Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects **1156**(1): 57-61.

Rummel, S., Hoelzl, S., Horn, P., Rossmann, A., Schlicht, C. (2010). "The combination of stable isotope abundance ratios of H, C, N and S with $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ for geographical origin assignment of orange juices." Food Chemistry **118**(4): 890-900.

Rummel, S., Hölzl, S., Horn, P. (2007). „Isotopensignaturen von Bio-und Geo-Elementen in der Forensik“. Biologische Spurenkunde, Springer: 381-407.

Rundel, P. W. (1988). "Stable isotopes in ecological research." Ecology **76**(5): 1683-1684.

Ryan, S. E., Snoeck, C., Crowley, Q. G., Babechuk, M. G. (2018). " $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and trace element mapping of geosphere-hydrosphere-biosphere interactions: A case study in Ireland." Applied Geochemistry **92**: 209-224.

Salamalikis, V., Argiriou, A., Dotsika, E. (2016). "Isotopic modeling of the sub-cloud evaporation effect in precipitation." Science of the Total Environment **544**: 1059-1072.

Salamalikis, V., Argiriou, A., Dotsika, E. (2016). "Periodicity analysis of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over Central Europe: Time–frequency considerations of the isotopic ‘temperature’ effect." Journal of Hydrology **534**: 150-163.

Sanusi, A., Wortham, H., Millet, M., Mirabel, P. (1996). "Chemical composition of rainwater in eastern France." Atmospheric environment **30**(1): 59-71.

Scheeres, M., Knipper, C., Hauschild, M., Schönfelder, M., Siebel, W., Vitali, D., Pare, C., Alt, K. W. (2013). "Evidence for "Celtic migrations"? Strontium isotope analysis at the early La Tène (LT B) cemeteries of Nebringen (Germany) and Monte Biele (Italy)." Journal of archaeological science **40**(10): 3614-3625.

Scheid, N. (2011). „Elementanalytik und Isotopenverhältnisbestimmungen an humanbiologischen Materialien“. Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Dissertation.

Schmidt-Nielsen, K. (1964). "Desert animals. Physiological problems of heat and water." Desert animals. Physiological problems of heat and water.

Schmidt-Nielsen, K. (1997). "Animal physiology: adaptation and environment." Cambridge University Press.

Schmidt, H.-L., Werner, R. A., Roßmann, A. (2001). "¹⁸O pattern and biosynthesis of natural plant products." Phytochemistry **58**(1): 9-32.

Schneider, L. V., Hall, M. P. (2005). "Stable isotope methods for high-precision proteomics." Drug discovery today **10**(5): 353-363.

Schoeller, D. (1990). "Changes in isotopic background The Doubly Labeled Water Method for Measuring Energy Expenditure: Technical Recommendations for Use in Humans Prentice A. 1990 Intl. Dietary Energy Consultants Group, Intl." Atomic Energy Agency Vienna, Austria **8**: 147-165.

Schoeller, D., Coward, W. (1990). "Practical consequences of deviations from the isotope elimination model." The Doubly-Labelled Water Method for Measuring Energy Expenditure. Technical Recommendations for Use in Humans, ed Prentice AM (International Atomic Energy Agency, Vienna): 166-192.

Schoeller, D. A. (1988). "Measurement of energy expenditure in free-living humans by using doubly labeled water." The Journal of nutrition **118**(11): 1278-1289.

Schoeller, D. A., Leitch, C. A., Brown, C. (1986). "Doubly labeled water method: in vivo oxygen and hydrogen isotope fractionation." American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology **251**(6): R1137-R1143.

Schroeder, H. A., Tipton, I. H., Nason, A. P. (1972). "Trace metals in man: strontium and barium." Journal of Chronic Diseases **25**(9): 491-517.

Schroter, R., Robertshaw, D., Baker, M., Shoemaker, V., Holmes, R., Schmidt-Nielsen, K. (1987). "Respiration in heat stressed camels." Respiration physiology **70**(1): 97-112.

Schuster, K.-D., Pflug, K. (1989). "The overall fractionation effect of isotopic oxygen molecules during oxygen transport and utilization in humans". Oxygen Transport to Tissue XI, Springer: 151-156.

Schweissing, M. M., Grupe, G. (2003). "Stable strontium isotopes in human teeth and bone: a key to migration events of the late Roman period in Bavaria." Journal of archaeological science **30**(11): 1373-1383.

Schwertl, M., Auerswald, K., Schnyder, H. (2003). "Reconstruction of the isotopic history of animal diets by hair segmental analysis." Rapid Communications in Mass Spectrometry **17**(12): 1312-1318.

Seiler, K.-P., Gat, J. R. (2007). "Groundwater recharge from run-off, infiltration and percolation." Springer Science & Business Media.

Sharp, Z., Cerling, T. (1998). "Fossil isotope records of seasonal climate and ecology: straight from the horse's mouth." Geology **26**(3): 219-222.

Siegenthaler, U., Oeschger, H. (1980). "Correlation of ^{18}O in precipitation with temperature and altitude." Nature **285**(5763): 314.

Sieper, H. P., Kupka, H. J., Williams, T., Rossmann, A., Rummel, S., Tanz, N., Schmidt, H. L. (2006). "A measuring system for the fast simultaneous isotope ratio and elemental analysis of carbon, hydrogen, nitrogen and sulfur in food commodities and other biological material." Rapid Communications in Mass Spectrometry: An International Journal Devoted to the Rapid Dissemination of Up-to-the-Minute Research in Mass Spectrometry **20**(17): 2521-2527.

Sillen, A. (1992). "Strontium-calcium ratios (Sr/Ca) of *Australopithecus robustus* and associated fauna from Swartkrans." Journal of Human Evolution **23**(6): 495-516.

Sillen, A., Hall, G., Richardson, S., Armstrong, R. (1998). " $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios in modern and fossil food-webs of the Sterkfontein Valley: implications for early hominid habitat preference." Geochimica et Cosmochimica Acta **62**(14): 2463-2473.

Sillen, A., Kavanagh, M. (1982). "Strontium and paleodietary research: a review." American journal of physical anthropology **25**(S3): 67-90.

Sillen, A., Sealy, J. C. (1995). "Diagenesis of strontium in fossil bone: A reconsideration of Nelson et al. (1986)." Journal of archaeological science **22**(2): 313-320.

Silver, I. (1969). "The Ageing of Domestic Animals." Science in Archaeology: a comprehensive survey of progress and research: 250.

Slater, P. A., Hedman, K. M., Emerson, T. E. (2014). "Immigrants at the Mississippian polity of Cahokia: strontium isotope evidence for population movement." Journal of archaeological science **44**: 117-127.

Smith, C. (1998). "Cellular and chemical events during enamel maturation." Critical Reviews in Oral Biology & Medicine **9**(2): 128-161.

Smith, H. F., Ritzman, T., Otárola-Castillo, E., Terhune, C. E. (2013). "A 3-D geometric morphometric study of intraspecific variation in the ontogeny of the temporal bone in modern Homo sapiens." Journal of Human Evolution **65**(5): 479-489.

Snyder, K. A., Williams, D. G. (2000). "Water sources used by riparian trees varies among stream types on the San Pedro River, Arizona." Agricultural and Forest Meteorology **105**(1-3): 227-240.

Sowden, E. M. (1958). "Trace elements in human tissue. 3. Strontium and barium in non-skeletal tissues." Biochemical Journal **70**(4): 712.

Soxhlet, F. (1879). "Die gewichtsanalytische Bestimmung des MilCHFettes". Polytechnisches Journal Band **232** (461–465).

Spencer, H., Li, M., Samachson, J. (1961). "Effect of high calcium intake on strontium 85 metabolism in man." The Journal of clinical investigation **40**(7): 1339-1345.

Sponheimer, M., Lee-Thorp, J. A. (1999). "Oxygen isotopes in enamel carbonate and their ecological significance." Journal of archaeological science **26**(6): 723-728.

Stahl, W. R. (1967). "Scaling of respiratory variables in mammals." Journal of Applied Physiology **22**(3): 453-460.

Stanley, K. O., Faure, G. (1979). "Isotopic composition and sources of strontium in sandstone cements; the High Plains sequence of Wyoming and Nebraska." Journal of Sedimentary Research **49**(1): 45-53.

Sternberg, L. d. S. L. (1989). "Oxygen and hydrogen isotope ratios in plant cellulose: mechanisms and applications". Stable isotopes in ecological research, Springer: 124-141.

Stevenson, R., Desrochers, S., Hélie, J.-F. (2015). "Stable and radiogenic isotopes as indicators of agri-food provenance: Insights from artisanal cheeses from Quebec, Canada." International Dairy Journal **49**: 37-45.

Stewart, I. I., Thomson, T., Figeys, D. (2001). "18O labeling: a tool for proteomics." Rapid Communications in Mass Spectrometry **15**(24): 2456-2465.

Streit, B. (1982). "Water turnover rates and half-life times in animals studied by use of labelled and non-labelled water." Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology **72**(3): 445-454.

Stumpp, C., Klaus, J., Stichler, W. (2014). "Analysis of long-term stable isotopic composition in German precipitation." Journal of Hydrology **517**: 351-361.

Swatland, H. J. (1994). "Structure and development of meat animals and poultry." CRC Press.

Talmage, R. V., Elliott, J. (1958). "Effect of time of injection on removal of Ca-45 and Sr-85 by peritoneal lavage." Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine **99**(2): 306-309.

Tang, K., Feng, X. (2001). "The effect of soil hydrology on the oxygen and hydrogen isotopic compositions of plants' source water." Earth and planetary science letters **185**(3-4): 355-367.

Taylor, C. R. (1970). "Dehydration and heat: effects on temperature regulation of East African ungulates." American Journal of Physiology-Legacy Content **219**(4): 1136-1139.

Terzer, S., Wassenaar, L., Araguás-Araguás, L., Aggarwal, P. (2013). "Global isoscapes for $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in precipitation: improved prediction using regionalized climatic regression models." Hydrology and Earth System Sciences **17**(11): 4713-4728.

Thiem, I., Lu" pke, M., Seifert, H. (2004). "Factors influencing the $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -ratio in meat juices." Isotopes in environmental and health studies **40**(3): 191-197.

Tian, L., Masson-Delmotte, V., Stievenard, M., Yao, T., Jouzel, J. (2001). "Tibetan Plateau summer monsoon northward extent revealed by measurements of water stable isotopes." Journal of Geophysical Research: Atmospheres **106**(D22): 28081-28088.

Tierschutz-Schlachtverordnung (2012). Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz; Tierschutz-Schlachtverordnung vom 20. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2982).

Tieszen, L. L., Boutton, T. W., Tesdahl, K. G., Slade, N. A. (1983). "Fractionation and turnover of stable carbon isotopes in animal tissues: implications for $\delta^{13}\text{C}$ analysis of diet." Oecologia **57**(1-2): 32-37.

Tipple, B. J., Chau, T., Chesson, L. A., Fernandez, D. P., Ehleringer, J. R. (2013). "Isolation of strontium pools and isotope ratios in modern human hair." Analytica Chimica Acta **798**: 64-73.

Toncala, A. (2017). „Isotopiekartierung der archäologischen Inn-Eisack-Etsch-Passage“. Ludwig-Maximilians-Universität München, Dissertation.

Tonge, C., McCance, R. (1973). "Normal development of the jaws and teeth in pigs, and the delay and malocclusion produced by calorie deficiencies." Journal of anatomy **115**(Pt 1): 1.

Tortora, G. J., Derrickson, B. (2017). "Principles of anatomy & physiology." John Wiley & Sons, Incorporated.

Tortora, G. J., Petti, K. (2002). "Principles of human anatomy." John Wiley & Sons.

Tredget, E. E., Forsyth, N., Uji-Friedland, A., Chambers, M., Ghahary, A., Scott, P. G., Hogg, A. M., Burke, J. (1993). "Gas chromatography—mass spectrometry determination of $^{18}\text{O}_2$ in ^{18}O -labelled 4-

hydroxyproline for measurement of collagen synthesis and intracellular degradation." Journal of Chromatography B: Biomedical Sciences and Applications **612**(1): 7-19.

Trincherini, P. R., Baffi, C., Barbero, P., Pizzoglio, E., Spalla, S. (2014). "Precise determination of strontium isotope ratios by TIMS to authenticate tomato geographical origin." Food Chemistry **145**: 349-355.

Tsujimura, M., Abe, Y., Tanaka, T., Shimada, J., Higuchi, S., Yamanaka, T., Davaa, G., Oyunbaatar, D. (2007). "Stable isotopic and geochemical characteristics of groundwater in Kherlen River basin, a semi-arid region in eastern Mongolia." Journal of Hydrology **333**(1): 47-57.

Tucker, A., Widowski, T. (2009). "Normal profiles for deciduous dental eruption in domestic piglets: effect of sow, litter, and piglet characteristics." Journal of animal science **87**(7): 2274-2281.

Turk, J. R., Laughlin, M. H. (2004). "Physical activity and atherosclerosis: which animal model?" Canadian journal of applied physiology **29**(5): 657-683.

Tuross, N., Warinner, C., Kirsanow, K., Kester, C. (2008). "Organic oxygen and hydrogen isotopes in a porcine controlled dietary study." Rapid Communications in Mass Spectrometry **22**(11): 1741-1745.

Tütken, T. (2010). "Die Isotopenanalyse fossiler Skelettreste—Bestimmung der Herkunft und Mobilität von Menschen und Tieren." Anthropologie, Isotopie und DNA—biografische Annäherung an namenlose vorgeschichtliche Skelette. Tagungsband 2: 33-51.

Twardock, A. (1963). "Studies on the movement of calcium and strontium across the bovine mammary gland". The transfer of calcium and strontium across biological membranes, Academic Press New York: 327-340.

Urey, H. C. (1948). "Oxygen isotopes in nature and in the laboratory." Science **108**(2810): 489-496.

Valentine, B., Kamenov, G. D., Kenoyer, J. M., Shinde, V., Mushrif-Tripathy, V., Otarola-Castillo, E., Krigbaum, J. (2015). "Evidence for patterns of selective urban migration in the Greater Indus Valley (2600-1900 BC): A lead and strontium isotope mortuary analysis." PloS one **10**(4): e0123103.

Van der Straaten, C., Mook, W. (1983). "Stable isotopic composition of precipitation and climatic variability". Palaeoclimates and Palaeowaters: A collection of environmental isotope studies.

Van der Veer, G., Voerkelius, S., Lorentz, G., Heiss, G., Hoogewerff, J. (2009). "Spatial interpolation of the deuterium and oxygen-18 composition of global precipitation using temperature as ancillary variable." Journal of Geochemical Exploration **101**(2): 175-184.

Van Geldern, R., Baier, A., Subert, H. L., Kowol, S., Balk, L., Barth, J. A. (2014). "Pleistocene paleo-groundwater as a pristine fresh water resource in southern Germany—evidence from stable and radiogenic isotopes." Science of the Total Environment **496**: 107-115.

Van Geldern, R., Barth, J. A. (2012). "Optimization of instrument setup and post-run corrections for oxygen and hydrogen stable isotope measurements of water by isotope ratio infrared spectroscopy (IRIS)." Limnology and Oceanography: Methods **10**(12): 1024-1036.

Van Geldern, R., Kuhlemann, J., Schiebel, R., Taubald, H., Barth, J. A. (2014). "Stable water isotope patterns in a climate change hotspot: the isotope hydrology framework of Corsica (western Mediterranean)." Isotopes in environmental and health studies **50**(2): 184-200.

Vautour, G., Poirier, A., Widory, D. (2015). "Tracking mobility using human hair: What can we learn from lead and strontium isotopes?" Science & Justice **55**(1): 63-71.

Viner, S., Evans, J., Albarella, U., Pearson, M. P. (2010). "Cattle mobility in prehistoric Britain: strontium isotope analysis of cattle teeth from Durrington Walls (Wiltshire, Britain)." Journal of archaeological science **37**(11): 2812-2820.

Vitòria, L., Otero, N., Soler, A., Canals, À. (2004). "Fertilizer characterization: isotopic data (N, S, O, C, and Sr)." Environmental science & technology **38**(12): 3254-3262.

Voerkelius, S., Lorenz, G. D., Rummel, S., Quézel, C. R., Heiss, G., Baxter, M., Brach-Papa, C., Deters-Itzelsberger, P., Hoelzl, S., Hoogewerff, J. (2010). "Strontium isotopic signatures of natural mineral waters, the reference to a simple geological map and its potential for authentication of food." Food Chemistry **118**(4): 933-940.

Vohberger, M. (2011). „Lokal oder eingewandert? Interpretationsmöglichkeiten und Grenzen lokaler Strontium-und Sauerstoffisotopensignaturen am Beispiel einer Altgrabung in Wenigumstadt.“ Ludwig-Maximilians Universität München, Dissertation.

Vuille, M., Werner, M., Bradley, R., Keimig, F. (2005). "Stable isotopes in precipitation in the Asian monsoon region." Journal of Geophysical Research: Atmospheres **110**(D23).

Wadleigh, M. A., Veizer, J., Brooks, C. (1985). "Strontium and its isotopes in Canadian rivers: Fluxes and global implications." Geochimica et Cosmochimica Acta **49**(8): 1727-1736.

Waight, T. (2015). "Rb–Sr Geochronology (Igneous Rocks)." Encyclopedia of Scientific Dating Methods: 698-703.

Walser, M., Robinson, B. H. (1963). "Renal excretion and tubular reabsorption of calcium and strontium." The transfer of calcium and strontium across biological membranes: 305-326.

Walsh, W. R., Walton, M., Bruce, W., Yu, Y., Gillies, R. M., Svehla, M. (2003). "Cell structure and biology of bone and cartilage". Handbook of histology methods for bone and cartilage, Springer: 35-58.

Walstra, P. (1980). "Growth and carcass composition from birth to maturity in relation to feeding level and sex in Dutch landrace pigs." Veenman.

Wang, X. F., Yakir, D. (1995). "Temporal and spatial variations in the oxygen-18 content of leaf water in different plant species." Plant, Cell & Environment **18**(12): 1377-1385.

Wassenaar, L. I., Van Wilgenburg, S. L., Larson, K., Hobson, K. A. (2009). "A groundwater isoscape (δD , $\delta^{18}O$) for Mexico." Journal of Geochemical Exploration **102**(3): 123-136.

Waterman, A. J., Peate, D. W., Silva, A. M., Thomas, J. T. (2014). "In search of homelands: using strontium isotopes to identify biological markers of mobility in late prehistoric Portugal." Journal of archaeological science **42**: 119-127.

Watremez, C., Roeseler, J., De Kock, M., Clerbaux, T., Detry, B., Veriter, C., Reynaert, M., Gianello, P., Jolliet, P., Liistro, G. (2003). "An improved porcine model of stable methacholine-induced bronchospasm." Intensive care medicine **29**(1): 119-125.

Webb, E. C., Lewis, J., Shain, A., Kastrisianaki-Guyton, E., Honch, N. V., Stewart, A., Miller, B., Tarlton, J., Evershed, R. P. (2017). "The influence of varying proportions of terrestrial and marine dietary protein on the stable carbon-isotope compositions of pig tissues from a controlled feeding experiment." STAR: Science & Technology of Archaeological Research **3**(1): 28-44.

Weber, M. (2012). „Wasserversorgung beim Schwein“. Veredlungsproduktion Proteinmarkt. Landesanstalt für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau, Iden.

Weibel, E. R. (1984). „The pathway for oxygen: structure and function in the mammalian respiratory system.“ Harvard University Press.

Weibel, E. R., Bacigalupe, L. D., Schmitt, B., Hoppeler, H. (2004). "Allometric scaling of maximal metabolic rate in mammals: muscle aerobic capacity as determinant factor." Respiratory physiology & neurobiology **140**(2): 115-132.

Weiler, U. (2005). "Wachstum und Wachstumsregulation beim Schwein." Universität Hohenheim, Habilitation.

Welker, J. M. (2012). "ENSO effects on $\delta^{18}O$, δ^2H and d-excess values in precipitation across the US using a high-density, long-term network (USNIP)." Rapid Communications in Mass Spectrometry **26**(17): 1893-1898.

Welle, S. (2012). "Human protein metabolism." Springer Science & Business Media.

Welt (17.10.2019). „Rückruf von Wilke-Wurst in Brandenburg noch nicht beendet“. Welt. <https://www.welt.de/regionales/berlin/article202072478/Rueckruf-von-Wilke-Wurst-in-Brandenburg-noch-nicht-beendet.html>.

West, A., Ayliffe, L. K., Cerling, T. E., Robinson, T. F., Karren, B., Dearing, M., Ehleringer, J. R. (2004). "Short-term diet changes revealed using stable carbon isotopes in horse tail-hair." Functional Ecology **18**(4): 616-624.

West, A., February, E., Bowen, G. (2014). "Spatial analysis of hydrogen and oxygen stable isotopes ("isoscapes") in ground water and tap water across South Africa." Journal of Geochemical Exploration **145**: 213-222.

West, A. G., Patrickson, S. J., Ehleringer, J. R. (2006). "Water extraction times for plant and soil materials used in stable isotope analysis." Rapid Communications in Mass Spectrometry **20**(8): 1317-1321.

Weyhenmeyer, C. E., Burns, S. J., Waber, H. N., Macumber, P. G., Matter, A. (2002). "Isotope study of moisture sources, recharge areas, and groundwater flow paths within the eastern Batinah coastal plain, Sultanate of Oman." Water Resources Research **38**(10).

White, C., Longstaffe, F. J., Law, K. R. (2004). "Exploring the effects of environment, physiology and diet on oxygen isotope ratios in ancient Nubian bones and teeth." Journal of archaeological science **31**(2): 233-250.

White, C. D. (1993). "Isotopic determination of seasonality in diet and death from Nubian mummy hair." Journal of archaeological science **20**(6): 657-666.

White, C. D., Longstaffe, F. J., Spence, M. W., Law, K. R. (2000). "Teotihuacan state representation at Kaminaljuyú: evidence from oxygen isotopes." Journal of Anthropological Research **56**: 535-558.

White, C. D., Spence, M. W., Longstaffe, F. J., Law, K. R. (2000). "Testing the nature of Teotihuacan imperialism at Kaminaljuyu using phosphate oxygen-isotope ratios." Journal of Anthropological Research **56**(4): 535-558.

White, C. D., Spence, M. W., Longstaffe, F. J., Law, K. R. (2004). "Demography and ethnic continuity in the Tlailotlacan enclave of Teotihuacan: the evidence from stable oxygen isotopes." Journal of Anthropological Archaeology **23**(4): 385-403.

White, C. D., Spence, M. W., Stuart-Williams, H. L. Q., Schwarcz, H. P. (1998). "Oxygen isotopes and the identification of geographical origins: the Valley of Oaxaca versus the Valley of Mexico." Journal of archaeological science **25**(7): 643-655.

Whittemore, C. T. (1986). "An approach to pig growth modeling." Journal of animal science **63**(2): 615-621.

Wickman, F., Åberg, G. (1987). "Variations in the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio in lake waters from central Sweden." Hydrology Research **18**(1): 21-32.

Widdowson, E., Slater, J., Harrison, G., Sutton, A. (1960). "Absorption, excretion, and retention of strontium by breast-fed and bottle-fed babies." Lancet **2**: 941-944.

Williams, J. S., White, C. D., Longstaffe, F. J. (2005). "Trophic level and macronutrient shift effects associated with the weaning process in the Postclassic Maya." American Journal of Physical

Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists **128**(4): 781-790.

Wilson, R., Elliott, J., Dowker, S. (1999). "Rietveld refinement of the crystallographic structure of human dental enamel apatites." American mineralogist **84**(9): 1406-1414.

Wittemann, S. (2004). „Zur Altersbeurteilung beim Wildschwein (*Sus scrofa*, Linné, 1758) mit Hilfe von Merkmalen an den Zähnen unter besonderer Berücksichtigung der Canini“. Universitätsbibliothek Giessen.

Wolf, N., Bowen, G. J., del Rio, C. M. (2011). "The influence of drinking water on the δD and $\delta^{18}O$ values of house sparrow plasma, blood and feathers." Journal of Experimental Biology **214**(1): 98-103.

Wong, W., Cochran, W., Klish, W., Smith, E. O., Lee, L., Klein, P. (1988). "In vivo isotope-fractionation factors and the measurement of deuterium-and oxygen-18-dilution spaces from plasma, urine, saliva, respiratory water vapor, and carbon dioxide." The American journal of clinical nutrition **47**(1): 1-6.

Wright, L. E., Schwarcz, H. P. (1998). "Stable carbon and oxygen isotopes in human tooth enamel: identifying breastfeeding and weaning in prehistory." American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists **106**(1): 1-18.

Wright, L. E., Schwarcz, H. P. (1999). "Correspondence between stable carbon, oxygen and nitrogen isotopes in human tooth enamel and dentine: infant diets at Kaminaljuyu." Journal of archaeological science **26**(9): 1159-1170.

Wünschmann, S., Kühn, D.-I. I., Heidenreich, H., Fränzle, S., Wappelhorst, O., Markert, B. (2004). "Transfer von Elementen in die Muttermilch." Ecomed, Landsberg/Lech.

Yakir, D. (1992). "Variations in the natural abundance of oxygen-18 and deuterium in plant carbohydrates." Plant Cell Environ. **15**: 1005– 1020.

Yakir, D., DeNiro, M., Ephrath, J. (1990). "Effects of water stress on oxygen, hydrogen and carbon isotope ratios in two species of cotton plants." Plant, Cell & Environment **13**(9): 949-955.

Yang, T., Howard, B., Macfarlane, W. (1981). "Effects of food on drinking behaviour of growing pigs." Applied Animal Ethology **7**(3): 259-270.

Yurtsever, Y. (1975). "Worldwide survey of stable isotopes in precipitation." Rep. Sect. Isotope Hydrol., IAEA.

Yurtsever, Y., Gat, J. R. (1981). "Stable isotope hydrology: deuterium and oxygen-18 in the water cycle." Atmospheric waters: 103-142.

Zanconato, S., Cooper, D. M., Armon, Y., Epstein, S. (1992). "Effect of increased metabolic rate on oxygen isotopic fractionation." Respiration physiology **89**(3): 319-327.

Zazzo, A., Lécuyer, C., Mariotti, A. (2004). "Experimentally-controlled carbon and oxygen isotope exchange between bioapatites and water under inorganic and microbially-mediated conditions." Geochimica et Cosmochimica Acta **68**(1): 1-12.

Zhao, Y., Yang, S., Wang, D. (2016). "Stable carbon and nitrogen isotopes as a potential tool to differentiate pork from organic and conventional systems." Journal of the Science of Food and Agriculture **96**(11): 3950-3955.

Zhao, Y., Zhang, B., Chen, G., Chen, A., Yang, S., Ye, Z. (2014). "Recent developments in application of stable isotope analysis on agro-product authenticity and traceability." Food Chemistry **145**: 300-305.

Zimmermann, U., Cegla, U. (1973). "Der Deuterium-und Sauerstoff-18-Gehalt der Körperflüssigkeit des Menschen und seine Änderung bei Ortswechsel." Naturwissenschaften **60**(5): 243-246.

Zundel, G., Miekeley, W., Grisi, B. M., Förstel, H. (1978). "The H 2 18 O enrichment in the leaf water of tropic trees: Comparison of species from the tropical rain forest and the semi-arid region in Brazil." Radiation and environmental biophysics **15**(2): 203-212.

X. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Lage und Umgebung des Versuchshofes Scherm im Bayerischen Wald. Wie zu erkennen ist, liegt der Betrieb relativ abgelegen und ist weitgehend von Wald umgeben. Die zu erkennenden Felder und Wiesen um den Hof herum gehören teilweise zum Versuchshof und werden zum Anbau von Futtermitteln (Gras, Getreide etc.) genutzt (Satellitenbilder: © Google Maps 2019, Kartendaten © 2019 GeoBasis-DE/BKG (©2009)).	10
Abbildung 2 Unmittelbare Nutzflächen des Schweinehofes. Im Zentrum sind das Haupthaus und die Schweineställe zu sehen (Satellitenbilder: © Google Maps 2019, Kartendaten © 2019 GeoBasis-DE/BKG (©2009)).	10
Abbildung 3 Der Strontiumkreislauf vom Grundgestein in den Körper durch verschiedene Materialien und Trophiestufen (Coelho et al. 2017). Nicht eingezeichnet sind nicht-geologische Quellen.	12
Abbildung 4 Geologische und atmosphärische Strontiumquellen in der Biosphäre und das Zustandekommen der lokalen $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Isotopie in Tieren und Menschen. Verändert nach Hajj et al. (2017).	13
Abbildung 5 Strontium- (blau) und Calciumflüsse (weiß) im tierischen Organismus. Inputs (grün), Outputs (rot) und solche Reaktionen, die zu einer Diskriminierung von Strontium zugunsten von Calcium führen (blaue und weiße Pfeile).	20
Abbildung 6 Hauptaufnahme- und –abgabewege von Strontium und Calcium im Säugetierkörper, bei denen die Diskriminierung von Strontium (blau) gegenüber Calcium (gelb) eine Rolle spielt. Diskriminierung findet bei der Aufnahme über die Darmwand, der Exkretion über die Nieren und beim Transfer durch die Plazenta bzw. bei der Produktion von Milch statt. Bei den Wechselwirkungen zwischen Skelett und den sonstigen Körperbestandteilen sind hingegen keine signifikanten Diskriminierungsprozesse bekannt.	23
Abbildung 7 Graduelle zeitliche Veränderung der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse eines sich im stetigen Umbau befindlichen Gewebes nach Änderung der Strontiuminputs zum Zeitpunkt d von Input mit dem $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Wert a zu Input mit dem $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Wert b, welcher nach einer ausreichenden Zeit erreicht wird (Schweissing & Grupe 2003).	24
Abbildung 8 Sauerstoffflüsse im tierischen Organismus. Inputs (grün), Outputs (rot) und körperinnere Sauerstoffbewegungen: KW = Körperwasser (lila), DW = Darmwasser und Haare (gelb) und PO_4^{3-} = Knochen- bzw. Zahnschmelz-Phosphat (blau). F = Flussrate; $\delta^{18}\text{O}(\text{X})$ = Sauerstoffisotopie von Fluss oder Pool X; α und β = Fraktionierungsfaktoren; TW = Trinkwasser.	32
Abbildung 9 Vier Tage alte Versuchstiere mit Muttersau in Ferkelbox unter Wärmelampe.	55
Abbildung 10 Zwei Monate alte Versuchstiere in der separaten Ferkelbox.	56
Abbildung 11 Adulte Versuchstiere im Außengehege des Hofes.	56
Abbildung 12 Altersbedingte Änderung der Futterzusammensetzung bei den untersuchten Schweinen. Hochenergiefutter (gelb) war Hauptbestandteil der Nahrung der Muttersau während Trächtigkeit und Stillphase (ca. 90 %). Der Anteil des Hochenergiefutters wurde dann zunehmend durch Niedrigenergiefutter (grün) ersetzt, bis das Niedrigenergiefutter ca. 50 % und das Hochenergiefutter ca. 40 % ausmachte. Die Brot-Molke-Mischung (orange) wurde konstant zu ca. 10 % in allen Lebensphasen konsumiert.	57
Abbildung 13 Blutentnahme am fixierten Ferkel durch den Amtstierarzt.	61

Abbildung 14 Sektion von Ferkel 1 (rechts; wenige Tage nach Geburt verstorben) und Ferkel 2 (links; ca. 3 Wochen nach Geburt verstorben). Beschriftet sind sichtbare innere Organe, sowie diejenigen Beine, von denen Femur und Laufmuskel beprobt wurden.	63
Abbildung 15 Gehäuteter Kopf von Ferkel 1. Eingezeichnet sind Milchzähne, Kaumuskel und Mandibel.	64
Abbildung 16 Schweineschädel (adult) vor und nach der Mazeration.	65
Abbildung 17 Zahnkronen der untersuchten Dauermolare (M1 und M3). Die Krone von M3 war zum Schlachtzeitpunkt noch nicht vollständig mineralisiert, wie an der Oberflächenstruktur zu erkennen ist.	66
Abbildung 18 Aufbau der extern durchgeführten kryogenen Vakuumextraktion von Wasser im Labor des Kompetenzzentrum Stabile Isotope des Büsgen-Institutes unter Leitung von Dr. Jens Dyckmans.	85
Abbildung 19 Funktionsweise eines Massenspektrometers. Aus: Fry (2007).	87
Abbildung 20 Strontiumkonzentrationen der gemessenen Bodenlösungen (n = 8) und Wasserproben (n = 3) mit Angabe des Mittelwertes und Anzeige der Standardabweichung. Die Konzentration in den Bodenaufschlüssen ist fast einhundertmal so hoch wie die in den Trinkwasserproben und schwankt auch deutlich stärker.	90
Abbildung 21 Strontiumkonzentrationen der Kartoffeln und der Niedrigenergiefuttertypen Gras und Silage (jeder Futterttyp nur einmal gemessen).	90
Abbildung 22 Strontiumkonzentration des Brot-Molke-Gemisches (n = 1) und der enthaltenen Molke (n = 2) bzw. des enthaltenen Brotes (n = 1) im Einzelnen. Im Brot ist der Strontiumgehalt fast zwanzigmal höher, weswegen es einen stärkeren Einfluss auf die Gesamt-zusammensetzung des Futtertyps hat.	90
Abbildung 23 Strontiumkonzentration der Getreidemischung und ihrer einzelner Bestandteile (jeweils n = 1). Das beigemengte Mineralfutter weist deutlich höhere Konzentrationen auf, als die übrigen Bestandteile.	91
Abbildung 24 Strontiumkonzentrationen der verschiedenen untersuchten Schweineproben. Die mineralisierten Hartgewebeproben weisen sehr viel höhere Konzentrationen auf, als die Weichgewebe (n _{Zahnschmelz} = 2, n _{Mandibel} = 2, n _{Beinmuskel} = 4, n _{Kaumuskel} = 2, n _{Herz} = 2, n _{Leber} = 2, n _{Niere} = 2, n _{Blut} = 1).	92
Abbildung 25 Strontiumkonzentrationen der verschiedenen Weichgewebe mit Angabe von Mittelwert und Anzeige der Standardabweichung. Die Konzentrationen der verschiedenen Gewebe bewegen sich in einer ähnlichen Größenordnung.	92
Abbildung 26 Verteilung der stabilen Strontiumisotopenverhältnisse der Bodenlösungen (n = 14), Nahrungsbestandteile (n = 45) und Schweineproben (n = 61, ohne Borsten). Die Bodenproben weisen eine deutlich höhere Variabilität und auch insgesamt höhere ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr-Werte auf. Sie überschneiden sich kaum, bzw. gar nicht mit den Nahrungs- bzw. Schweineproben. Die geringste Variabilität findet sich in den Schweineproben.	94
Abbildung 27 Ergebnisse der ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr-Messungen von Schweine und Nahrungsproben (Trinkwasser und Futter) nach Probentyp. Die Futterproben sind nach den drei Kategorien NEF = Niedrigenergiefutter (Gras/Silage), B+M = Brot mit Molke und HEF = Hochenergiefutter (Getreidemischung/Kartoffeln) aufgeteilt. Der Mittelwert ± die einfache Standardabweichung ist für jede Futterkategorie als farbiger Kasten angegeben. Bei den Schweineproben wird nach Zahn-,	

Knochen und Weichgewebeproben unterschieden. Rot markiert sind hier die Proben, die von den beiden Ferkeln stammen.96

Abbildung 28 Kernel-Density-Graphen von verschiedenen $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Datensätzen der untersuchten Proben (Bandwidth: 0.0001). A: Gesamtdatensatz der Schweineproben: Die drei Borstenproben können eindeutig als Ausreißer auf der rechten Seite erkannt werden. Die Daten sind hier nicht normalverteilt (($p = 4 \cdot 10^{-9}$, Shapiro-Wilk). B: Alle Schweinedaten ohne Borstenproben: Eine Normalverteilung liegt nach wie vor nicht vor ($p = 3 \cdot 10^{-5}$, Shapiro-Wilk). C: Adulte Schweine (nur mineralisierte Hartgewebe): Die Kurve wird leicht geglättet, indem die Ferkelproben von den Proben der adulten Tiere getrennt werden und die Weichgewebeproben herausgenommen, trotzdem gibt es nach wie vor eine starke Abweichung auf der linken Seite, welche durch die ersten Molaren verursacht wird ($p = 6 \cdot 10^{-5}$, Shapiro-Wilk). D: Adulte Schweine (nur Hartgewebe ohne M1): Wenn die früh mineralisierenden ersten Molaren herausgenommen werden, folgen die übrigen Hartgewebeproben der Schweine nun einer Normalverteilung ($p = 0.93$, Shapiro-Wilk) (Anders et al. 2018).97

Abbildung 29 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse aller gemessenen Schweineproben einschließlich der für die spätere Auswertung ausgeschlossenen Borstenproben, welche eindeutig erkennbar vom Rest des Datensatzes nach oben hin abweichen. Bei den Zähnen lässt sich erkennen, dass das Isotopenverhältnis mit der späteren Mineralisationszeit von Milchzähnen bis hin zu dritten Molaren ansteigt. Auch die Knochen der Ferkel (grau eingekreist) weisen niedrigere Werte auf, als die der adulten Tiere (Anders et al. 2018).100

Abbildung 30 Intraindividuelle Verteilung der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse in den verschiedenen Körperbestandteilen (Anders et al. 2018). Die Phalanges-Proben konnten keinem der beiden Individuen 3 oder 4 sicher zugeordnet werden, weswegen sie zwischen den beiden dargestellt sind (orangener Kasten).101

Abbildung 31 Massebilanzmodell nach Luz et al. (1984). Voraussetzung hierfür ist ein Gleichgewicht zwischen Inputs und Outputs („steady-state Modell“). Die konstante Verschiebung von $\delta^{18}\text{O}(\text{CO}_2)$ gegenüber $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ wurde von Luz et al (1989) bestimmt und stimmt mit zuvor publizierten Werten von Pflug et al. (1979) und Brenninkmeijer et al. (1983) für die Fraktionierung bei Körpertemperatur überein.117

Abbildung 32 Massebilanzmodell nach Bryant & Froelich (1995).119

Abbildung 33 Boxplot: Gesamtübersicht über die $\delta^{18}\text{O}$ -Ergebnisse, aufgeteilt nach Probenotyp und zusammengefasst nach Kategorien: Blau: Trinkwasser, Grün: Futter, Rot: Weichgewebe, Lila: Borsten, Grau: Phosphat im Bioapatit von Knochen und Zahnschmelz.127

Abbildung 34 Boxplot der $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ -Ergebnisse, aufgeteilt nach Wasserquellen. Die Einzelmesswerte sind als Punkte angezeigt. Rot markiert sind zwei Werte, die möglicherweise durch Evaporationsprozesse nach der Beprobung verändert wurden.128

Abbildung 35 Vergleich der gemessenen $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ -Werte (Mittelwerte für den jeweiligen Monat) mit der monatlichen und Jahresschätzung nach OIPC.131

Abbildung 36 Boxplot der $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$ -Ergebnisse (Trockenmasse), eingeteilt in Niedrigenergiefutter (Gras und Silage), Hochenergiefutter (Getreidemischung und Kartoffeln), Brot und Molke und Sonstiges (in vernachlässigbaren Mengen konsumiert). Die Einzelmesswerte sind als Punkte markiert und weiter unterteilt.132

Abbildung 37 Gesamtübersicht über die $\delta^{18}\text{O}$ -Ergebnisse für die verschiedenen Schweineproben, aufgeteilt nach Individuen.135

- Abbildung 38** $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Ergebnisse der Weich-gewebe, aufgeteilt nach Individuen (1-6). Die Isotopenverhältnisse der beiden jüngsten Individuen liegen am höchsten, die der ersten Schlachtung am niedrigsten.137
- Abbildung 39** $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Ergebnisse der Weichgewebe, aufgeteilt nach Gewebetypen. Nur für den Laufmuskel („Bein“) standen Werte der beiden Ferkel (Ind. 1-2) zur Verfügung (rot markiert). Alle Gewebe ähneln sich stark in ihrer $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Verteilung.139
- Abbildung 40** $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Ergebnisse der Weichgewebe, aufgeteilt nach Individuen (1-6). Die Isotopenverhältnisse der beiden jüngsten Individuen liegen am niedrigsten (zusammen mit dem Laufmuskel von Individuum 4), die der adulten Individuen insgesamt höher. Die adulten Individuen und die beiden Schlachtungen scheinen sich nicht systematisch zu unterscheiden.141
- Abbildung 41** $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Ergebnisse der Weichgewebe, aufgeteilt nach Gewebetypen. Nur für den Laufmuskel („Bein“) standen Werte der beiden Ferkel (Ind. 1-2) zur Verfügung, weswegen diese ausgeschlossen wurden. Die Gewebe unterscheiden sich sichtbar in ihrer $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Verteilung. Am größten ist der Unterschied beim Lebergewebe und den Laufmuskeln zu erkennen.143
- Abbildung 42** $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ -Ergebnisse nach groben Altersgruppen: Ferkel = 3 Wochen bzw. 14 Wochen; Schweine = 14 bzw. 15 Monate. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Ferkel liegen deutlich über den Werten der adulten Tiere, wobei die 14-wöchigen Tiere die höchsten Werte aufweisen.146
- Abbildung 43** Boxplot der einzelnen Zahntypen: Milchzähne (von Individuum 1 und 2), M1 und M3 (jeweils Dauermolaren von Individuum 3-6). Die ersten Molaren weichen von den beiden anderen Zahntypen eindeutig nach oben ab.152
- Abbildung 44** Boxplot und Jitterplot der Knochenproben. Zu jedem Knochentyp wurden die Einzelmesswerte mit Beschriftung des jeweiligen Individuums eingetragen. Wie zu erkennen ist, weicht Individuum 2 bei Mandibel und Femur nach oben hin ab, nicht jedoch bei Pars petrosa. Individuum 1 weicht dafür bei der Pars petrosa nach unten hin ab. Fußknochen wurden nur bei den adulten Individuen beprobt, die der ersten Schlachtung konnten keinen konkreten Individuum zugeordnet werden (jeweils 3 oder 4).153
- Abbildung 45** Vergleich der gemessenen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Werte mit den Vorhersagen der artspezifischen linearen Regression nach Longinelli (1984) bzw. der korrigierten Gleichung nach Bryant & Froelich (1995), basierend auf der Umrechnung von $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ in $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$. Mittelwert (MW) \pm Standardabweichung (σ) und Minimum (Min) bzw. Maximum (Max). Die vom Stilleffekt betroffenen Ferkelproben stellen eindeutige Ausreißer dar. Keine der getesteten Versionen der Regressionsgleichung kann die Gesamtheit aller gemessenen Werte erklären. Grundsätzlich liegen beide jedoch innerhalb des beobachteten Bereiches von $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$156
- Abbildung 46** Vergleich der gemessenen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Werte mit den Vorhersagen der Massebilanzmodelle nach Bryant & Froelich (1995) (A) und Gretebeck et al. (1997) (B). B1 = Gretebeck-Modell mit dort zitierten Fraktionierungsfaktoren, B2 = Gretebeck-Modell mit Fraktionierungsfaktoren aus Bryant & Froelich (1995), B3 = Gretebeck-Modell mit Fraktionierungsfaktoren aus Podlesak et al. (2008). Angabe von Maximum und Minimum für gewichtete Mischung der Futterproben-Typen und für die absoluten Extremwerte von $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$. Keines der Modelle erfasst die gesamte Wertespanne gemessener Proben, vor allem nicht, wenn nur das jeweilige Maximum und Minimum der Futtermischung eingesetzt wird. Alle Modellversionen überschneiden sich jedoch mit dem Wertebereich der gemessenen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Ergebnisse. Der vom Stilleffekt beeinflusste $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Wert von Individuum 1 stellt auch hier einen Ausreißer dar, der von Individuum 2 ist hingegen in den meisten Modellversionen enthalten (zumindest innerhalb der Absolutgrenzen).158

- Abbildung 47** Vergleich der gemessenen $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ -Werte mit den Vorhersagen der Massebilanzmodelle nach Podlesak et al. (2008) und Gretebeck et al. (1997) (A) und Ehleringer et al. (2008) (B). A1 = Podlesak-Gretebeck-Modell mit dort zitierten Fraktionierungsfaktoren, A2 = Fraktionierungsfaktoren aus Bryant & Froelich (1995). B1 = Ehleringer-Modell mit dort zitierten Werten für g_1 und g_2 , B2 = mit Werten von g_1 und g_2 nach Bowen et al. (2009), B3 = mit Werten g_1 und g_2 nach O'Grady et al. (2012), B4 = Postulierte Werte: $g_1 = 0$ und $g_2 = 1$. Angabe von Mittelwerten, Maximum und Minimum für gewichtete Mischung der Futterproben-Typen und für die absoluten Extremwerte von $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$ beim Podlesak-Gretebeck-Modell. Keines der Modelle erfasst die Wertespanne gemessener Proben adulter Tiere, außer B4. Die übrigen Modellversionen überschneiden sich nicht einmal mit dem Wertebereich der gemessenen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Ergebnisse für die geschlachteten Schweine, dafür gibt es aber große Überschneidungen mit den Werten subadulter, vom Stilleffekt betroffener Tiere.161
- Abbildung 48** Vergleich der gemessenen $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Werte mit den Vorhersagen der artspezifischen linearen Regression nach Longinelli (1984), basierend auf der Umrechnung von $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ in $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$. Mittelwert (MW) \pm Standardabweichung (σ) und Minimum (Min) bzw. Maximum (Max). Die vom Stilleffekt betroffenen Werte der ersten Molaren (M1) stellen eindeutige Ausreißer dar, die Knochen von Individuum 2 jedoch nicht. Grundsätzlich liegt die Schätzung innerhalb des beobachteten Bereiches von $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$, jedoch scheint die, auf dem Trinkwasser basierende Schätzung insgesamt zu hoch zu liegen, sodass einige Knochenwerte nach unten hin herausfallen.163
- Abbildung 49** Vergleich der $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Werte mit verschiedenen Literaturwerten für $\alpha_{\text{PO}_4\text{-KW}}$. Zum Mittelwert (MW), dem höchsten (Max) und dem niedrigsten (Min) Messwert für $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ wurde jeweils der jeweilige publizierte Wert addiert, um so $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ zu errechnen. Zusätzlich wurde dasselbe für den höchsten gemessenen $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Wert der Ferkel durchgeführt um auch die vom Stilleffekt betroffenen Proben vergleichen zu können. Keiner der Literaturwerte führt zu einem Ergebnis, das die gesamte Bandbreite der beobachteten Werte korrekt widerspiegelt (sowohl mit, als auch ohne Stilleffekt).164
- Abbildung 50** Repräsentationszeiten der beprobten Gewebe: Die unterschiedlichen genommenen Proben der untersuchten Tiere zum jeweiligen Beprobungszeitpunkt und der Zeitspanne, über das das jeweilige Gewebe ungefähr isotopisch integriert. Auf dem Zeitstrahl sind wichtige Lebensabschnitte gekennzeichnet, die Einfluss auf die Isotopie der Proben gehabt haben können. Ebenfalls eingezeichnet ist der Zeitraum, in dem der Stilleffekt einen Einfluss haben sollte. Alle Gewebe, die in ihren Repräsentationszeiten eine Überschneidung mit einem bestimmten Zeitraum zeigen, sollten zumindest teilweise von den Einflüssen in diesem Zeitraum mitbestimmt sein.173
- Abbildung 51** $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Verhältnisse nach Gewebe und Individuum. Nur für den Laufmuskel konnten auch Werte für die beiden Ferkel gemessen werden (blau). Wie zu erkennen ist, liegen die Daten der Ferkel am höchsten. Es bestehen jedoch auch deutliche inter-individuelle Unterschiede bei den adulten Tieren.177
- Abbildung 52** $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Verhältnisse nach Gewebe und Individuum. Nur für den Laufmuskel konnten auch Werte für die beiden Ferkel gemessen werden (blau). Wie zu erkennen ist, liegen die Daten der Ferkel in diesem Fall nicht oberhalb der adulten Werte. Die inter-individuelle Unterschiede bei den adulten Tieren sind teilweise höher, als die zwischen adulten Tieren und Ferkeln, bzw. zwischen den beiden Ferkeln.185
- Abbildung 53** $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Verhältnisse nach Knochentyp und Individuum. Während sich Mandibula und Femur ähnlich verhalten und bei Individuum 2 einen eindeutigen Anstieg der Isotopenverhältnisse aufweisen, folgt die Pars petrosa eindeutig nicht diesem Muster, sondern zeigt seine höchsten Werte erst bei den adulten Tieren.197

XI. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Variablen zur Modellierung von Sauerstoff-Isotopen-Flüssen im tierischen Organismus. Flussraten geben an, welche Menge an Sauerstoff über den entsprechenden Stoffwechselweg bewegt wird. Der $\delta^{18}\text{O}$ -Wert beschreibt das Verhältnis der stabilen Sauerstoffisotope des jeweiligen Flusses. Fraktionierungsfaktoren beschreiben die physikalische oder physiologische Fraktionierung im Zuge einer Sauerstoffbewegung.	34
Tabelle 2 Typische katabolische Stoffwechselreaktionen für den oxidativen Abbau von Kohlenhydraten, Fetten und Proteinen.	48
Tabelle 3 Fütterung der Versuchstiere in den verschiedenen Lebensphasen. Nach dem Abstillen wurden die Tiere zunächst ad libitum gefüttert, nach ca. 12-14 Wochen wurde der Zugang zum Kraftfutter (Getreideschrot, Brot und Molke) begrenzt. Der Anteil der Brot-Molke-Mischung blieb in etwa konstant bei um die 10 %.	58
Tabelle 4 Übersicht über die Beprobung und die jeweilig am Probenmaterial durchgeführten Messungen.	60
Tabelle 5 Sektionsbeschreibung für die frühzeitig verstorbenen Ferkel (Ind. 1 und 2) und die linken Kopfhälften, Beine und Füße der geschlachteten Tiere (Ind. 3-6).	63
Tabelle 6 Protokoll für die Vorbereitung der Zahn- und Knochenproben für die Säulentrennung.	67
Tabelle 7 Protokoll für die Säulentrennung zur Strontiumextraktion.	69
Tabelle 8 Protokoll für die Extraktionsmethode von Strontium aus tierischem Weichgewebe mittels Trockenveraschung.	71
Tabelle 9 Protokoll für die Extraktionsmethode von Strontium aus tierischem Weichgewebe mittels Nassveraschung nach Baroni et al. (2011).	72
Tabelle 10 Protokoll für die Reinigung der Haar- bzw. Borstenproben.	73
Tabelle 11 Vergleich der drei Extraktionsmethoden von Strontium aus keratinhaltigem Material.	74
Tabelle 12 Protokoll für die Vorbereitung der zuvor gesiebten Bodenproben für die Säulentrennung.	77
Tabelle 13 Protokoll für die Vorbereitung der trockenveraschten Futterproben für die Säulentrennung.	79
Tabelle 14 Protokoll zur Apatitextraktion aus Knochen und Zahnschmelz.	82
Tabelle 15 Protokoll zur Silberphosphat-Fällung aus Apatit.	83
Tabelle 16 Protokoll für den Ablauf der kryogenen Vakuumextraktion.	86
Tabelle 17 Beobachtete Variabilität der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verteilung im Gesamtdatensatz und verschiedenen Teilkategorien (einschließlich Boden-, Wasser-, Futter- und Schweineproben) und wiederum Unterstichproben dieser.	93
Tabelle 18 Normalverteilungstests für Stichproben und Teilstichproben von Boden-, Nahrungs- und Schweineproben aller untersuchten Gewebetypen mit Ausnahme der Borsten (s.u.). Nur die	

Schweinedaten weichen, im Gegensatz zu Boden, Trinkwasser und Futter signifikant von einer Normalverteilung ab.	94
Tabelle 19 Test auf gleiche Mittelwerte der verschiedenen Probentypen und der verschiedenen Futterkategorien. Für den Vergleich zweier normalverteilter Stichproben wurde der T-Test verwendet (sämtliche Umwelt- und Nahrungsproben), für den Vergleich signifikant von einer Normalverteilung abweichender Stichproben der Mann-Whitney-Test (alle Vergleiche mit den Schweineproben).	95
Tabelle 20 p-Werte der Mann-Whitney-Tests auf gleiche Mittelwerte zwischen den einzelnen Individuen (alle Gewebetypen, außer Borsten) (Anders et al. 2018). Individuen verschiedener Altersklassen („Ferkel vs. Schweine“) sind signifikant verschieden voneinander (fett gedruckt), die Individuen derselben Altersklassen unterscheiden sich nicht signifikant voneinander (schräg gedruckt).	98
Tabelle 21 Interindividuelle Variabilität der Strontiumisotopenverhältnisse (Anders et al. 2018): Variabilität der Probentypen. Die niedrigsten Bandbreiten finden sich in den distalen Knochen der Extremitäten (Metatarsi und Phalanges, nur für adulte Schweine gemessen). Die höchste Variabilität findet sich in den Borstenproben (welche aus der späteren Interpretation herausgenommen wurden), gefolgt von den Mandibelproben (welche auch für die Ferkel gemessen werden konnten).	98
Tabelle 22 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Ergebnisse der untersuchten Zähne, aufsteigend nach Größe (Anders et al. 2018). Wie zu erkennen ist, steigen die Werte mit der fortschreitenden Mineralisationszeit von Milchzähnen bis zu dritten Molaren an.	100
Tabelle 23 Intraindividuelle Variabilität der Strontiumisotopenverhältnisse aller gemessenen Proben (ohne Borstenproben), aufsteigend sortiert von 0.00065 bis 0.00183 (Anders et al. 2018).	102
Tabelle 24 Erläuterung und Berechnung der physiologischen Größen, die für die Schätzung von $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ nach Bryant & Froelich (1995) benötigt werden. Alle davon können über die Körpermasse (M) berechnet werden.	120
Tabelle 25 Inputs und Outputs laut dem Bryant-Modell. Alle Flussraten können über die in Tabelle 24 beschriebenen Größen berechnet (geschätzt) werden. Bei den $\delta^{18}\text{O}$ -Werten handelt es sich entweder um Literaturwerte, auf Literaturwerten basierende Schätzungen oder im Zuge des Experiments erhobene Messwerte.	120
Tabelle 26 Werte für die Fraktionierungsfaktoren des Bryant-Modells.	121
Tabelle 27 Werte für die Sauerstoffflüsse, die im Gretebeck-Modell verwendet werden.	122
Tabelle 28 Die von Gretebeck et al. (1997) und Podlesak et al. (2008) verwendeten Fraktionierungsfaktoren mit entsprechenden Quellenangaben.	122
Tabelle 29 In verschiedenen Studien angenommene Werte für g_1 und g_2	124
Tabelle 30 Publierte Werte für $\alpha_{\text{PO4-KW}}$. Angegeben ist neben der Quelle auch, welche Tierart und welches Gewebe untersucht wurden, sowie die Stichprobengröße (n).	125
Tabelle 31 $\delta^{18}\text{O}$ -Verteilung der Umwelt- und Trinkwasserproben-Ergebnisse ($\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$). Angegeben sind die Stichprobengrößen, Gesamtwertebereiche, Mittelwerte und Standardabweichungen der Gesamtstichprobe und der einzelnen beprobten Wasserquellen. Die Datensätze wurden auch auf Normalverteilung getestet (Shapiro-Wilk Test). Rot markiert sind Datensätze, die signifikant von einer Normalverteilung abweichen.	129

Tabelle 32 Wasserquellen: Test auf gleiche Mittelwerte. T-Test für normalverteilte Datensätze, Mann-Whitney-Test für den Vergleich von Datensätzen, bei denen mindestens einer nicht normalverteilt ist. Es konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Wasserquellen festgestellt werden.	129
Tabelle 33 Tageszeiten: $\delta^{18}\text{O}$ -Verteilung, Mittelwerte, Normalverteilung und Test auf gleiche Mittelwerte. Sowohl die morgens, als auch nachmittags beprobten Wasserproben sind normalverteilt und unterscheiden sich nicht signifikant in ihren Mittelwerten.	130
Tabelle 34 $\delta^{18}\text{O}$ -Verteilung der Futter-Trockenmasse-Ergebnisse ($\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$) und Futter-Wasser-Ergebnisse ($\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{OFutter})$). Angegeben sind die Stichprobengrößen, Gesamtwertebereiche, Mittelwerte und Standardabweichungen der Gesamtstichprobe und der einzelnen Futtertypen (bei $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$). Alle Gesamt- und Teildatensätze sind normalverteilt (Shapiro-Wilk).	133
Tabelle 35 Futterproben: Test auf gleiche Mittelwerte. T-Test für normalverteilte Datensätze, Mann-Whitney-Test für den Vergleich von Datensätzen, bei denen mindestens einer nicht normalverteilt ist. Signifikante Unterschiede sind rot markiert. Niedrigenergiefutter (Gras und Silage) und Hochenergiefutter (Getreidemischung und Kartoffel) unterscheiden sich signifikant, ebenso auch die Futter-Trockenmasse und das Futterwasser. Auch das Trinkwasser unterscheidet sich vom Futterwasser signifikant. Keine signifikanten Unterschiede konnten zwischen Brot und Molke und den anderen beiden Futterkategorien festgestellt werden.	133
Tabelle 36 $\delta^{18}\text{O}$ -Verteilung der Gewebswasser-Ergebnisse ($\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$), aufgeteilt nach Beprobungszeiträumen bzw. Individuen. Angegeben sind die Stichprobengrößen, Gesamtwertebereiche, Mittelwerte und Standardabweichungen der Gesamtstichprobe und der einzelnen Untergruppen. Alle Gesamt- und Teildatensätze sind normalverteilt, außer die $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Werte von Individuum 5 und die der Ferkel, für welche keine ausreichend große Stichprobe zur Verfügung stand (Shapiro-Wilk). Signifikante Abweichungen von der Normalverteilung sind rot markiert.	137
Tabelle 37 Körperwasserproben nach Beprobungszeiträumen bzw. Individuen: Test auf gleiche Mittelwerte. T-Test für normalverteilte Datensätze, Mann-Whitney-Test für den Vergleich von Datensätzen, bei denen mindestens einer nicht normalverteilt ist. Signifikante Unterschiede sind rot markiert. Die Mittelwerte aller getesteten Datensätze unterscheiden sich signifikant, außer Individuum 3 und Individuum 4.	138
Tabelle 38 $\delta^{18}\text{O}$ -Verteilung der Gewebswasser-Ergebnisse ($\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$) adulter Individuen (3-6), aufgeteilt nach Gewebetypen bzw. Gewebegruppen. Angegeben sind die Stichprobengrößen, Gesamtwertebereiche, Mittelwerte und Standardabweichungen der Gesamtstichprobe und der einzelnen Untergruppen. Alle Gesamt- und Teildatensätze sind normalverteilt (Shapiro-Wilk). Die beiden $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Werte von Ind. 1 und 2 (Laufmuskel) wurden nicht berücksichtigt, da von diesen Individuen keine Werte für die anderen Gewebetypen zur Verfügung standen.	139
Tabelle 39 Körperwasserproben nach Gewebetypen bzw. -gruppen: T-Test auf gleiche Mittelwerte. Die Mittelwerte aller getesteten Datensätze sind nicht signifikant verschieden. Die beiden $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Werte von Ind. 1 und 2 (Laufmuskel) wurden nicht berücksichtigt, da von diesen Individuen keine Werte für die anderen Gewebetypen zur Verfügung standen.	140
Tabelle 40 $\delta^{18}\text{O}$ -Verteilung der Gewebe-Trockenmasse-Ergebnisse ($\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$), aufgeteilt nach Beprobungszeiträumen bzw. Individuen. Angegeben sind die Stichprobengrößen, Gesamtwertebereiche, Mittelwerte und Standardabweichungen der Gesamtstichprobe und der einzelnen Untergruppen. Alle Gesamt- und Teildatensätze sind nicht normalverteilt, außer die	

$\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Werte der ersten Schlachtung (Shapiro-Wilk). Von den Ferkeln (Ind. 1-2) stand keine ausreichend große Stichprobe für einen Test auf Normalverteilung zur Verfügung. Signifikante Abweichungen von der Normalverteilung sind rot markiert.142

Tabelle 41 Trockenmasseproben nach Beprobungszeiträumen: Mann-Whitney-Test auf gleiche Mittelwerte. Die Mittelwerte aller getesteten Datensätze unterscheiden sich nicht signifikant, der Unterschied zwischen den Ferkeln und den Schweinen, sowie zwischen den Ferkeln und der zweiten Schlachtung, liegt allerdings nah an der Signifikanzgrenze, trotz einer geringen Stichprobe bei den Ferkeln.142

Tabelle 42 $\delta^{18}\text{O}$ -Verteilung der Gewebe-Trockenmasse-Ergebnisse ($\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$) adulter Individuen (3-6), aufgeteilt nach Gewebetypen bzw. Gewebegruppen. Angegeben sind die Stichprobengrößen, Gesamtwertebereiche, Mittelwerte und Standardabweichungen der Gesamtstichprobe und der einzelnen Untergruppen. Der Gesamtdatensatz weicht signifikant von der Normalverteilung ab. Die einzelnen Teildatensätze sind normalverteilt, mit Ausnahme der Laufmuskeln und der Gruppe „Organe“ (Herz, Leber, Niere) (Shapiro-Wilk). Die beiden $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Werte von Ind. 1 und 2 (Laufmuskel) wurden nicht berücksichtigt, da von diesen Individuen keine Werte für die anderen Gewebetypen zur Verfügung standen.144

Tabelle 43 Trockenmasseproben nach Gewebetypen bzw. -gruppen: T-Test auf gleiche Mittelwerte. Die Mittelwerte aller getesteten Datensätze sind signifikant verschieden, außer die von Herz und anderen Muskelgeweben, Herz und Kaumuskel und Kaumuskel und Niere. Der Unterschied zwischen Leber und anderen Gewebe(-gruppen) ist besonders signifikant. Die beiden $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Werte von Ind. 1 und 2 (Laufmuskel) wurden nicht berücksichtigt, da von diesen Individuen keine Werte für die anderen Gewebetypen zur Verfügung standen. Signifikante Unterschiede sind rot markiert.145

Tabelle 44 $\delta^{18}\text{O}$ -Verteilung der Borsten-Ergebnisse ($\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$), aufgeteilt nach Altersgruppen. Angegeben sind die Stichprobengrößen, Gesamtwertebereiche, Mittelwerte und Standardabweichungen der Gesamtstichprobe und der einzelnen Untergruppen. Der Gesamtdatensatz weicht signifikant von der Normalverteilung ab, die einzelnen Teildatensätze hingegen sind normalverteilt (Shapiro-Wilk), sofern ein Test auf Normalverteilung möglich ist. Signifikante Abweichungen von der Normalverteilung sind rot gekennzeichnet.147

Tabelle 45 Borstenproben nach Altersgruppen: T-Test auf gleiche Mittelwerte für normalverteilte Daten, Mann-Whitney Test für nicht-normalverteilte Daten. Ferkel und Schweine unterscheiden sich signifikant voneinander (sowohl mit dem dreiwöchigen Individuum, als auch ohne). Die Borsten der ersten Schlachtung (Ind. 3-4) unterscheiden sich nicht signifikant von denen der zweiten Schlachtung (Ind. 5-6). Signifikante Unterschiede sind rot markiert.147

Tabelle 46 $\delta^{18}\text{O}$ -Verteilung der Phosphat-Ergebnisse ($\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$) aufgeteilt nach Gewebetypen bzw. Gewebegruppen, Beprobungszeiträumen und in Abhängigkeit vom Mineralisationszeitraum. Angegeben sind die Stichprobengrößen, Gesamtwertebereiche, Mittelwerte und Standardabweichungen der Gesamtstichprobe und der einzelnen Untergruppen. Der Gesamtdatensatz weicht signifikant von der Normalverteilung ab, genauso wie die Gesamtheit aller Knochen und die aller Zähne. Die einzelnen Teildatensätze hingegen sind normalverteilt (Shapiro-Wilk). Signifikante Abweichungen von der Normalverteilung sind rot gekennzeichnet.149

Tabelle 47 Phosphatproben nach Gewebetypen bzw. Teilgruppen: T-Test auf gleiche Mittelwerte für normalverteilte Daten, Mann-Whitney Test für nicht-normalverteilte Daten. Knochen und Zähne unterscheiden sich signifikant voneinander. Erste Molaren unterscheiden sich von Milchzähnen und dritten Molaren (jeweils einzeln und zusammen) signifikant. Milchzähne und M3 unterscheiden sich nicht signifikant. Die Knochen von Individuum 2 weichen signifikant von den übrigen Knochen ab.

Ebenso unterscheiden sich die Knochen der ersten und zweiten Schlachtung. Probenotypen mit Stilleffekt lassen sich statistisch von solchen ohne unterscheiden, aber auch Knochen und Zähne unterscheiden sich (jeweils beide mit oder beide ohne Stilleffekt-Anteil). Die einzelnen Knochentypen der adulten Schweine unterscheiden sich nicht signifikant. Signifikante Unterschiede sind rot markiert.	151
Tabelle 48 Modellgrenzwerte der verschiedenen angewandten Massebilanz-Modellversionen. Das Bryant- und das Gretebeck-Modell (A und B) unterscheiden sich in der zugrundeliegenden Modell-Berechnung, die einzelnen Variationen des Gretebeck-Modells (B1, B2 und B3) unterscheiden sich lediglich in den Werten der Fraktionierungsfaktoren α_2 , β_1 und β_2	159
Tabelle 49 Modellgrenzen der getesteten Modelle zur Schätzung von $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$. Mittelwerte (MW), Minimum und Maximum und absoluten Extremwerten (nur beim Podlesak-Gretebeck-Modell). ...	162
Tabelle 50 Grenzen der Schätzung basierend auf den linearen Regressionsgleichungen zur Berechnung von $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ basierend auch $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ für Menschen. Die beiden Schätzungen erfassen beide nur eine einzige gemessene Borstenprobe von einem vom Stilleffekt betroffenen Ferkel. Beide Schätzungen liegen nah beieinander und decken nur einen sehr schmalen Wertebereich ab, da sie in ihrer Wertespanne direkt von der Verteilung der Trinkwasserproben abhängen.	162
Tabelle 51 Differenzen zwischen den $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Werten der Messungen am Gewebswasser der Laufmuskeln für die einzelnen Individuen. Angaben in ‰.	176
Tabelle 52 Differenzen zwischen den $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ -Werten der Messungen an der Trockenmasse der Laufmuskeln für die einzelnen Individuen. Angaben in ‰.	184
Tabelle 53 $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Ergebnisse der einzelnen Knochentypen nach Individuum und Differenzen zwischen den beiden Ferkeln. Angaben in ‰.	196
Tabelle 54 $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Ergebnisse der einzelnen Knochentypen nach Individuum und Differenzen zwischen Ferkeln und adulten Schweinen. Angaben in ‰.	197
Tabelle 55 Differenzen zwischen verschiedenen $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Proben und dem Körperwasser für die einzelnen Individuen (in ‰).	202
Tabelle 56 Übersicht über die metabolischen Eigenschaften der untersuchten Gewebetypen. Verschiedene Faktoren können diese beeinflussen und zu Variationen führen. Dazu gehören beispielsweise Wachstum (welches in den Testindividuen definitiv eine Rolle spielt), Aktivitätslevel, Art (nicht alle Quellen beziehen sich spezifisch auf Schweine), Gesundheitszustand usw. Trotzdem wird klar, über welche groben Zeiträume die entsprechenden Gewebe integrieren bzw. welche Lebensphasen sie in etwa widerspiegeln.	262
Tabelle 57 Liste der verwendeten Geräte und Verbrauchsmaterialien (kursiv die von externen Kooperationspartnern verwendeten Materialien).	263
Tabelle 58 Liste der verwendeten Chemikalien (kursiv die von externen Kooperationspartnern verwendeten Reagenzien).	266
Tabelle 59 Stabile Strontiumisotopenverhältnisse und Strontiumkonzentrationen der untersuchten Proben. SE = Standardfehler, Sr-Konz. = Strontiumkonzentration. Quellwasser war das eigentliche Trinkwasser der Schweine, Lokales Leitungswasser wurde zum Vergleich mitbestimmt.	268
Tabelle 60 Ergebnisse der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Messungen des mitgeführten Standards NBS NIST 1400 ("bone ash").	271

Tabelle 61 Ergebnisse der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Messungen des in Nördlingen mitgeführten Standards SRM 987 mit Anzahl der Messungen (n), Mittelwert (MW) und absoluter Standardabweichung (SD).	271
Tabelle 62 Liste aller gemessenen Strontiumkonzentrationen: Der Standard „NBS NIST 1400“ wurde bei den Messungen standardmäßig mitgeführt und führte zu der angegebenen Variation. Die Angaben für die Bodenproben beziehen sich auf das Strontium, welches mittels der verwendeten Methode aus einem Gramm Probe gelöst werden konnte.	271
Tabelle 63 Liste aller gemessenen Trink- und Umweltwasserproben: $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ -Messergebnisse mit Datum und Tageszeit der Beprobung und Unterteilung in verschiedene Wasserquellen. Bis auf das Leitungswasser stand Wasser aus allen Quellen den Schweinen als Trinkwasser zur Verfügung. Leitungswasser wurde in der Testphase nicht konsumiert, wird aber in trockenen Jahren, in denen die Quelle austrocknet gegeben.	273
Tabelle 64 Liste aller gemessenen Futterproben: $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$ - und $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}(\text{Futter}))$ -Messergebnisse mit Datum der Beprobung. Für Proben, die mehrfach gemessen wurden sind die Einzelmessungen angegeben, sowie der Mittelwert (MW), welcher für die Auswertung verwendet wurde.	274
Tabelle 65 Liste aller gemessenen Weichgewebeproben: $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ - und $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Messergebnisse mit Datum der Beprobung, Individuum und Alterskategorie. Alle untersuchten Individuen wurden am 09.04.2016 geboren.	275
Tabelle 66 Liste aller gemessenen Phosphatproben: $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Messergebnisse von Knochen und Zahnschmelz mit Datum der Beprobung, Individuum und Alterskategorie. Alle untersuchten Individuen wurden am 09.04.2016 geboren.	276
Tabelle 67 Liste aller gemessenen Borstenproben: $\delta^{18}\text{O}(\text{Haar})$ -Messergebnisse mit Datum der Beprobung, Alter bei der Beprobung, Alterskategorie und Individuum. Für Proben, die mehrfach gemessen wurden sind die Einzelmessungen angegeben, sowie der Mittelwert (MW), welcher für die Auswertung verwendet wurde. Alle untersuchten Individuen wurden am 09.04.2016 geboren.	278
Tabelle 68 Liste der bei den $\delta^{18}\text{O}$ -Messungen mitgeführten Standards.	278

XII. Anhang

A. Einleitung

Tabelle 56 Übersicht über die metabolischen Eigenschaften der untersuchten Gewebetypen. *Verschiedene Faktoren können diese beeinflussen und zu Variationen führen. Dazu gehören beispielsweise Wachstum (welches in den Testindividuen definitiv eine Rolle spielt), Aktivitätslevel, Art (nicht alle Quellen beziehen sich spezifisch auf Schweine), Gesundheitszustand usw. Trotzdem wird klar, über welche groben Zeiträume die entsprechenden Gewebe integrieren bzw. welche Lebensphasen sie in etwa widerspiegeln.*

Gewebe	Metabolische Eigenschaften und Zeiträume, über die das Gewebe integriert / die das Gewebe reflektiert	Quellen
Zahnschmelz	<ul style="list-style-type: none"> • Metabolisch inert (kein Remodeling nach der Mineralisation) • In den Testschweinen: <ul style="list-style-type: none"> - Milchzähne: in utero - M1: 2.-3. Monat - M3: 3.-13. Monat 	Budd et al. (2000), Hölzl et al. (2004), Hillson (2005), Meiggs (2007), Rummel et al. (2007), Lee-Thorp (2008), Tütken (2010), Lehn & Graw (2012), Lehn & Graw (2014)
Knochen	<ul style="list-style-type: none"> • Kontinuierliches Remodeling • Turnover langsam • Letzte Jahre/Jahrzehnte, abhängig von Knochentyp, Alter (Wachstumsphase) und Art • In Testschweinen (<14 Monate alt, Wachstum noch nicht vollständig abgeschlossen): Integration über die gesamte Lebenszeit 	Dolphin & Eve (1963), Bryant & Loutit (1964), Reichle et al. (1970), Ericson (1985), Dahl et al. (2001), Beyser et al. (2003), Hölzl et al. (2004), Rummel et al. (2007), Tütken (2010), Lehn & Graw (2012), Lehn & Graw (2014), Crowley et al. (2017)
Borsten/Haar	<ul style="list-style-type: none"> • Metabolisch inert (kein Remodeling nach der Bildung) • Letzte Monate (abhängig von Art und Haarlänge) • In Testschweinen: ca. 1-5 Monate 	Hölzl et al. (2004), Rummel et al. (2007), Tütken (2010), Font et al. (2012), Lehn & Graw (2012), Tipple et al. (2013), Lehn & Graw (2014), Chau et al. (2017)
Fleisch	<ul style="list-style-type: none"> • Kontinuierliches Remodeling • Turnover schnell • Tage bis Wochen 	Tieszen et al. (1983), Rummel et al. (2007), Webb et al. (2017)
Organe	<ul style="list-style-type: none"> • Kontinuierliches Remodeling • Turnover schnell bis sehr schnell, abhängig vom Organtyp (die Leber hat zum Beispiel sehr hohe Turnoverraten) • Tage bis Monate 	Tieszen et al. (1983), Rummel et al. (2007), Webb et al. (2017)
Blut	<ul style="list-style-type: none"> • Kontinuierliches Remodeling • Turnover sehr schnell • Stunden bis Tage/Wochen 	Eisenberg & Gordan (1961), Tieszen et al. (1983), Rummel et al. (2007), Webb et al. (2017)

B. Methoden

Tabelle 57 Liste der verwendeten Geräte und Verbrauchsmaterialien (*kursiv die von externen Kooperationspartnern verwendeten Materialien*).

Bezeichnung	Spezifizierung	Firma
Alufolie	Verschiedene Stärken	Roth
Atomabsorptionsspektrometer	<i>contrAA® 800</i>	<i>Analytik Jena AG</i>
Bandsäge	HBS20	Scheppach
Batch-Mühle	<i>Tube Mill 100 control</i>	<i>IKA</i>
Crimp Neck Vial	<i>0,6mL</i>	<i>IVA, Omnilab</i>
Dichtungsringe	<i>Mit PTFE-Folie</i>	<i>Rettberg</i>
Elektrorasierer	HQ6696	Philips
EPA - Gewindeflaschen	<i>ND4, 40mL</i>	<i>IVA, Omnilab</i>
Falcon-Röhrchen	Verschiedene Größen	Sarstedt
Feinbohrschleifer	FBS 240/E	Proxxon
Feinwaage (präzise)	Explorer EX125D (0,01 mg; 0,1 mg)	OHAUS®
Feinwaage (weniger präzise)	Analytical Plus	OHAUS®
Filter für Säulen	Poröse e, HDPE, 35µm	Reichert Chemietechnik GmbH & Co.
Gewebekulturplatten	96 Well, F-Form, TC	Greiner bio-one
Gewindeflaschen	<i>ND8, 1,5mL</i>	<i>IVA, Omnilab</i>
Glaspipetten	10mL	Roth
Glaswolle (Laborfilterwatte)		<i>IVA, Omnilab</i>
Handschleifgerät		
Heizplatte	PTFE hotplater ICP 300, säurefest	Stuart
Heizplatte	Typ CP 300, säureresistent	Roth
Heizplatte	Robax Ceran 500, Typ 11A	Schott
HPLC-Spritzenfilter	PTFE, 0,45µm, 25mm	neoLab
HSW-Einmalspritzen	PVC-, latex- und silikonölfrei, 25mL	Norm-Ject®
HT-O Pyrolyseofen		<i>Hekatech</i>
ICP-OES Gerät	<i>Optima 3200 XL</i>	<i>PerkinElmer</i>

Indikatorpapier (Tritest)	Universalindikatorpapier pH 1-11	Macherey-Nagel
<i>IRIS-analyzer</i>	<i>L 1102-i WSCRDS</i>	<i>Picarro</i>
Klebeband		Niceday
Klebeband		Tesafilm
Kugelschwingmühle	Typ MM200	Retsch
Kühltruhe		Bauknecht
Kühltruhe	GT151-5A	Exquisit
KWS-Schliff-Fett		Roth
<i>Isotopenverhältnis-Massenspektrometer</i>	<i>DeltaV Advantage</i>	<i>Thermo</i>
Laborglaswaren		Schott Duran
Latexhandschuhe		Roth
<i>LN2 - liquid nitrogen</i>		<i>KOSI</i>
Lyophilisator	Alpha 1-4 LD-2	CHRIST®
Multi®-SafeSeal®Tubes	1,5-1,7mL	Roth
Magnetrührer	Ikamag Reo	Bachofer
Mahlbecher und Kugeln	Edelstahl	Retsch
Metallmörser und -pistill	Edelstahl, rostfrei	Haustechnik
<i>Mikrowellenaufschlussgerät</i>	<i>Ethos</i>	<i>MLS</i>
<i>Mikrowellenaufschluss-Behälter</i>	<i>MPV 100</i>	<i>MLS</i>
Muffelofen	Typ M 104	Heraeus
Nassschleifpapier für Tellerschleifmaschine	Körnung 2000	Struers
Nitrilhandschuhe		Roth
<i>Papiertütchen</i>		<i>IVA, Omnilab</i>
Parafilm	„M“	Bemis, IVA, Omnilab
Pipetten	1000 ml, 200ml	Eppendorf
Pipettenspitzen	Standard Universal, 100-1000µL	Roth
<i>Pipettenspitzen</i>	<i>epTIPS Standard</i>	<i>IVA, Omnilab</i>

Porzellanmörser mit Pistill	90mm	Haldenwanger
Porzellantiegel	Niedrig, mittelhohe und hohe Form, glasiert, 20mL	Haldenwanger, neoLab
Porzellantiegel	Typ C 110	Roth
Prüfsieb	DIN 4188, Maschenweiten: 0,125 mm, 0,5µm	Retsch
Rotilabo®-Probenbeutel	LDPE, verschiedene Größen	Roth
Safe-Lock Tubes	2.0mL	Eppendorf
Saugball		Roth
Schere		Laborbestand
Schnappdeckelgläser	Rollrand, 10mL	Roth
Schrumpfschlauch	Teflon (PTFE), 12,7mm/3,66mm	Mauritz Communication & Electronics
Schüttler	shaker DOS-10L	neoLab
Silberkapseln	silver capsules for solids, 3,2x4mm	IVA Analysetechnik
S-Monovette®	K3E, 9mL, 1,6mg EDTA/mL Blut	Sarstedt
Soxhlet-Extraktor	250mL	Roth
Spezialglühbirnen	235V, 15W, 300°C	Göttinger Elektronikcenter
Strontium-Abzug	Captair SD321	Erlab
Teflonbecher	5-10ml	Roland Vetter Laborbedarf OHG
Teflonröhrchen	10mL, Oak-Ridge-Zentrifugenröhrchen	Fischer
Teflonspritzflaschen	125mL, 250mL	Roth
Teflonwürfel	3ml	Roland Vetter Laborbedarf OHG
Trockenschrank	T5050	Heraeus
Trockenschrank	Loading Modell 100-800	Memmert
Ultraschallbad		Bachofer
Ultrazentrifugalmühle	ZM200	Retsch
Urinprobenbecher	Polypropylen, 125mL	Medi-Inn
Vakuumpumpe	RZE	Vacubrand
Vakuumpumpe		Haustechnik

Vortex Mixer	7-2020	neoLab
Tischwaage	DeltaRange PM4600	Mettler Toledo
Watte		Hartmann
Wägebapier	90x115mm	Macherey-Nagel
Wetterstation	WS6750	TechnoLine
Zahnarztschleifer	EWL Typ 4950	KaVo
Zahnbürste		Colgate
Zellkulturflaschen	Cellstar®, 250mL, steril	Greiner bio-one
Zentrifuge	2K15	Sigma
Zentrifuge	Z233MK-2	Hermle

Tabelle 58 Liste der verwendeten Chemikalien (*kursiv die von externen Kooperationspartnern verwendeten Reagenzien*).

Bezeichnung	Spezifizierung	Firma
Aceton		Hausversorgung
Ameisensäure	> 98%, zur Synthese	Roth
Ammoniak-Lösung	30-33%, reinst	Roth
Ammoniumnitrat	≥99%, p.a.	Roth
Ca-acetat-Monohydrat	≥99%, p.a., ACS	Roth
<i>Certipur Calcium-Standardlösung</i>	<i>1000mg/L</i>	<i>Merck</i>
<i>Certipur ICP-Multielement Standard IV</i>	<i>1000mg/L</i>	<i>Merck</i>
<i>Certipur Strontium-Standardlösung</i>	<i>1000mg/L</i>	<i>Merck</i>
Diethylether	≥99,5%, p.a., stab.	Roth
<i>Enzym OSA</i>		<i>Bauer Handels GmbH</i>
Essigsäure	100% (Eisessig), p.a.	Merck
Ethanol	vergällt	Merck
Flusssäure Ultra-Qualität	ultra, ~48%	Roth
Kaliumhydroxid	≥85%, p.a., in Plätzchen	Roth
Natriumhypochlorid-Lösung	12% Cl	Roth
NBS 120C	Phosphate rock Standard	National Institute of Standards and Technology

NBS NIST 1400	Bone Ash, Sr 249 µg/g (+-7)	National Bureau of Standards and Technology
SRM 987	Sr 100ppm	National Institute of Standards and Technology
Reference Material IAEA-V-10 Hey	Sr 40µg/g (37-44µg/g); Ca 22.6 mg/g (21-22.2 mg/g)	Analytical Quality Service der IAEA
Salpetersäure	> 65%, p.a. ISO	Roth
Salpetersäure Supra-Qualität	supra, 69%	Roth
Salpetersäure Ultra-Qualität	ultra, 69%	Roth
Salpetersäure, suprapur	suprapur, 65%	Merck
Salzsäure rauchend	37%, p.a., ACS, ISO	Roth
Salzsäure Supra-Qualität	supra, 35%	Roth
Säulenmaterial	50x100µm	Triskem
SR-spec Resin-B		
Silbernitrat	Zur Analyse	neoLab
Supralan 67		Bauer Handels GmbH
Supralan UF		Bauer Handels GmbH
Wasser, deion.	deionisiert	Haustechnik
Wasser, bidest.	Doppelt destilliert	Roth
Wasserstoffperoxid, rein	rein, stabilisiert, 35%	Roth
Wasserstoffperoxid, reinst	reinst EP, USP, 30%	Labochem
Wasserstoffperoxid, suprapur	Suprapur, 30%	Merck

C. Ergebnisse

1. Strontium

Tabelle 59 Stabile Strontiumisotopenverhältnisse und Strontiumkonzentrationen der untersuchten Proben. SE = Standardfehler, Sr-Konz. = Strontiumkonzentration. Quellwasser war das eigentliche Trinkwasser der Schweine, Lokales Leitungswasser wurde zum Vergleich mitbestimmt.

Proben- kategorie	Probentyp		Probennummer	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2SE[%]	Sr- Konz. [µg/g]	
Boden (Auszug)	Boden vom Hof (auf dem die Schweine lebten)		P-So-1	0.738813	0.002		
			P-So-2	0.726093	0.002		
			P-So-3	0.716741	0.002		
			P-So-4	0.744543	0.002		
			P-So-6	0.737071	0.004		
			P-So-7	0.727534	0.003		
			P-So-8	0.728926	0.003		
			P-So-9	0.748248	0.005		
			P-So-11				8.06
	Boden von den Feldern (auf denen das Futter angebaut wurde)		P-Nu-1-S	0.714247	0.003	11.20	
			P-So-5	0.723810	0.002	7.07	
			P-So-10				6.39
			P-So-12	0.736024	0.002	14.00	
			P-So-13	0.734367	0.004	7.77	
			P-So-14	0.730812	0.002	10.10	
			P-So-15	0.734604	0.003	9.81	
Wasser	Quellwasser (Trinkwasser)		P-Wa-1	0.715059	0.002		
			P-Wa-2	0.715329	0.003		
			P-Wa-3	0.715449	0.003		
			P-Wa-5	0.714847	0.005		
			P-Wa-6	0.715004	0.004		
			P-Wa-7	0.715014	0.003		
			P-Wa-37				0.132
			P-Wa-38				0.136
			P-Wa-39				0.111
	Leitungswasser (nicht als Trinkwasser verwendet)		P-Wa-4	0.713120	0.004		
			P-Wa-8	0.713138	0.006		
			P-Wa-40				0.027
	Futter	Kartoffeln		P-Nu-1a	0.707055	0.002	
P-Nu-1d				0.710135	0.002		
P-Nu-9				0.711023	0.002		
P-Nu-25				0.709611	0.009		
P-Nu-33				0.708202	0.008	0.581	
Getreidemischung		P-Nu-4	0.708896	0.001			
		P-Nu-5m	0.708761	0.002			
		P-Nu-12	0.710354	0.003			
		P-Nu-20	0.709028	0.004			
		P-Nu-36	0.706988	0.002		3.270	
		P-Nu-52	0.708185	0.003			
Einzel- bestandteile: Getreide- mischung		Roggen	P-Nu-5a	0.707345	0.002	1.165	
		Weizen	P-Nu-5b	0.708067	0.002	1.810	
		Erbsen	P-Nu-5c	0.706927	0.003	2.391	
	Hafer	P-Nu-5d	0.710836	0.002	2.323		

		Buchweizen	P-Nu-5e	0.711099	0.002	0.879
		Galium	P-Nu-5f	0.708125	0.003	8.536
		Anorganik	P-Nu-5g	0.708667	0.010	
		Unkräuter	P-Nu-5h	0.710623	0.002	20.484
		Haferähre	P-Nu-49a	0.711132	0.002	
		Erbsenpflanze	P-Nu-49c	0.709682	0.004	
		Mineralfutter 1	P-Nu-137	0.707619	0.002	110.0
		Mineralfutter 2	P-Nu-82	0.708655	0.003	
			P-Nu-165	0.710230	0.003	71.1
	Brot mit Molke		P-Nu-2	0.711172	0.003	
			P-Nu-10	0.711241	0.002	
			P-Nu-34	0.710732	0.003	1.102
	Brot		P-Nu-3	0.708538	0.002	
			P-Nu-11	0.710729	0.002	
			P-Nu-19	0.711968	0.003	
			P-Nu-35	0.712020	0.003	1.949
			P-Nu-51	0.712486	0.002	
	Molke		P-Nu-6	0.712449	0.001	0.099
			P-Nu-14	0.716708	0.003	
			P-Nu-30	0.715705	0.003	0.110
			P-Nu-46a	0.714894	0.005	
	Silage		P-Nu-7	0.711932	0.002	
			P-Nu-15	0.713857	0.003	
			P-Nu-23	0.711874	0.002	
			P-Nu-Sil	0.711349	0.002	
			P-Nu-47	0.711036	0.003	12.445
	Gras		P-Nu-8a	0.712812	0.002	
			P-Nu-16	0.711953	0.002	
			P-Nu-24	0.713192	0.003	
			P-Nu-32	0.715783	0.004	
			P-Nu-40	0.713827	0.003	
			P-Nu-48	0.710187	0.003	
			P-Nu-49b	0.711156	0.002	
			P-Nu-56	0.716441	0.002	
			P-Nu-64	0.711783	0.003	4.728
			P-Nu-72	0.716718	0.003	
			P-Nu-80	0.709228	0.004	
			P-Nu-88	0.713087	0.003	
	Einstreu (Stroh/Heu)		P-XB-2a	0.711680	0.003	
			P-XB-2b	0.719283	0.001	
			P-Nu-39	0.714836	0.002	20.613
			P-Nu-55	0.720140	0.003	
	Apfel		P-Nu-81	0.718045	0.004	0.955
	Milch (Muttersau)		P-Mi-1	0.711863	0.005	
Schweine	Zahnschmelz	Milchzähne	P-To-1-1	0.710393	0.003	
			P-To-1-3	0.710168	0.004	
			P-To-1-5	0.710123	0.003	
			P-To-2-1	0.710607	0.004	
			P-To-2-3	0.710333	0.003	
			P-To-2-5	0.710600	0.007	
		Erste Molare (M1)	P-To-3-M1	0.710650	0.003	54.3
			P-To-4-M1	0.710962	0.002	56.6
			P-To-5-M1	0.711097	0.004	
			P-To-6-M1	0.710600	0.003	

		Dritte Molare (M3)	P-To-3-M3	0.711595	0.002	
			P-To-4-M3	0.711979	0.004	
			P-To-5-M3	0.711728	0.003	
			P-To-6-M3	0.711577	0.002	
Knochen	Pars petrosa		P-Bo-1-2	0.710829	0.005	
			P-Bo-2-2	0.710092	0.005	
			P-Bo-3-Par	0.711712	0.003	
			P-Bo-4-Par	0.711578	0.002	
			P-Bo-5-Par	0.711658	0.003	
			P-Bo-6-Par	0.711552	0.003	
	Mandibel		P-Bo-1-3	0.709810	0.005	
			P-Bo-3-Man	0.711741	0.004	86.9
			P-Bo-4-Man	0.711587	0.003	94.8
			P-Bo-5-Man	0.711731	0.004	
			P-Bo-6-Man	0.711573	0.003	
	Femur		P-Bo-1-1	0.710376	0.006	
			P-Bo-2-1	0.710682	0.004	
			P-Bo-3-Fe	0.711312	0.002	
			P-Bo-4-Fe	0.711526	0.003	
			P-Bo-5-Fe	0.711685	0.002	
			P-Bo-6-Fe	0.711621	0.003	
	Metatarsus		P-Bo-5-Mi	0.711752	0.003	
			P-Bo-6-Mi	0.711509	0.003	
	Phalanx		P-Bo-3/4-Phal1	0.711657	0.003	
			P-Bo-3/4-Phal2	0.711532	0.002	
			P-Bo-3/4-Phal3	0.711640	0.003	
			P-Bo-3/4-Phal4	0.711545	0.002	
Weich-gewebe	Muskel	Bein	P-Me-1-Fe	0.711265	0.002	0,050
			P-Me-2-Fe	0.710822	0.002	0,040
			P-Me-3-Fe	0.710077	0.002	0,024
			P-Me-4-Fe	0.710147	0.003	0,038
			P-Me-5-Fe	0.711233	0.004	
			P-Me-6-Fe	0.710818	0.004	
		Kau	P-Me-3-Mas	0.710168	0.003	0.024
			P-Me-4-Mas	0.710593	0.004	0.022
			P-Me-5-Mas	0.711444	0.005	
			P-Me-6-Mas	0.711810	0.003	
	Herz		P-Or-3-He	0.711185	0.004	0.018
			P-Or-4-He			0.013
			P-Or-5-He	0.711407	0.004	
			P-Or-6-He	0.711520	0.004	
	Leber		P-Or-3-Li	0.710882	0.006	<0.017
			P-Or-4-Li	0.711821	0.005	0.018
			P-Or-5-Li	0.711295	0.003	
			P-Or-6-Li	0.711570	0.004	
	Niere		P-Or-3-Ki	0.711765	0.004	0.035
			P-Or-4-Ki	0.711507	0.006	0.025
			P-Or-5-Ki	0.711366	0.004	
			P-Or-6-Ki	0.711335	0.002	
	Blut		P-BI-4	0.711522	0.003	0.017
			P-BI-5	0.711577	0.002	
			P-BI-6	0.711195	0.002	

Tabelle 60 Ergebnisse der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Messungen des mitgeführten Standards NBS NIST 1400 ("bone ash").

NBS NIST 1400	0.71307	0.0026
NBS NIST 1400	0.71313	0.0024
NBS NIST 1400	0.71308	0.0021
NBS NIST 1400	0.71307	0.0123
NBS NIST 1400	0.71302	0.0025
NBS NIST 1400	0.71303	0.0018
NBS NIST 1400	0.71303	0.0026
NBS NIST 1400	0.71303	0.0033
NBS NIST 1400	0.71307	0.0034
NBS NIST 1400	0.71309	0.0022

Tabelle 61 Ergebnisse der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Messungen des in Nördlingen mitgeführten Standards SRM 987 mit Anzahl der Messungen (n), Mittelwert (MW) und absoluter Standardabweichung (SD).

n	55
MW	0.70120
SD	0.00005

Tabelle 62 Liste aller gemessenen Strontiumkonzentrationen: Der Standard „NBS NIST 1400“ wurde bei den Messungen standardmäßig mitgeführt und führte zu der angegebenen Variation. Die Angaben für die Bodenproben beziehen sich auf das Strontium, welches mittels der verwendeten Methode aus einem Gramm Probe gelöst werden konnte.

Kategorie	Bezeichnung	Probennummer	Sr [$\mu\text{g/g}$] bzw. [mg/L]
Standard	NBS NIST 1400	NBS NIST 1400	249 (± 7)
Boden	Aufschlusslösung aus 1 g Boden-probe	P-Nu-1-S	11.2
		P-So-5	7.1
		P-So-10	6.4
		P-So-11	8.1
		P-So-12	14.0
		P-So-13	7.8
		P-So-14	10.1
		P-So-15	9.8
Wasser (in mg/L)	Trinkwasser	P-Wa-37	0.132
		P-Wa-38	0.136
		P-Wa-39	0.111
		P-Wa-40	0.027

Anhang

Futter	Apfel	P-Nu-81	0.955
	Brot mit Molke	P-Nu-34	1.102
	Brot	P-Nu-35	1.949
	Molke	P-Nu-6	0.099
		P-Nu-30	0.110
	Getreidemischung	P-Nu-36	3.270
	Erbsen	P-Nu-21	2.391
	Roggen		1.165
	Hafer		2.323
	Weizen		1.810
	Unkräuter		20.484
	Buch-		0.879
	weizen		
	Galium		8.536
	Mineral-	P-Nu-137	110
	futter	P-Nu-165	71.1
	Kartoffel	P-Nu-33	0.581
	Gras	P-Nu-64	4.728
	Silage	P-Nu-47	12.445
	Stroh/Heu	P-Nu-39	20.613
Schweine	Zahn-schmelz (M1)	P-To-3*-M1	54.3
		P-To-4*-M1	56.6
	Knochen (Mandibel)	P-Bo-3*-Man	86.9
		P-Bo-4*-Man	94.8
	Beinmuskel	P-Me-1*-Fe	0.050
		P-Me-2*-Fe	0.03981892
		P-Me-3*-Fe	0.0236245
		P-Me-4*-Fe	0.03840274
	Kaumuskel	P-Me-3*-Mas	0.02397411
		P-Me-4*-Mas	0.02236438
	Herz	P-Or-3*-He	0.01787349
		P-Or-4*-He	0.0125740
	Leber	P-Or-3*-Li	<0,017056

	P-Or-4*-Li	0.018153
Niere	P-Or-3*-Ki	0.034963
	P-Or-4*-Ki	0.02500950
Borsten	P-Br-3*	<2,6
	P-Br-4*	1.75

2. Sauerstoff

Tabelle 63 Liste aller gemessenen Trink- und Umweltwasserproben: $\delta^{18}\text{O}(\text{TW})$ -Messergebnisse mit Datum und Tageszeit der Beprobung und Unterteilung in verschiedene Wasserquellen. Bis auf das Leitungswasser stand Wasser aus allen Quellen den Schweinen als Trinkwasser zur Verfügung. Leitungswasser wurde in der Testphase nicht konsumiert, wird aber in trockenen Jahren, in denen die Quelle austrocknet gegeben.

Wasserquelle	Probennummer	Tageszeit	Messergebnis ($\delta^{18}\text{O}$ vs VSMOV)	Datum der Beprobung
Haupttränke	P-Wa- 1a	nachmittags	-9.84	13.04.2016
	P-Wa- 1m	morgens	-10.09	13.04.2016
	P-Wa- 17a	nachmittags	-9.74	17.06.2016
	P-Wa- 17m	morgens	-10.51	14.06.2016
	P-Wa- 29a	nachmittags	-8.78	03.08.2016
	P-Wa- 33m	morgens	-10.06	16.08.2016
	P-Wa- 53a	nachmittags	-11.26	12.11.2016
Quellwasser	P-Wa- 2a	nachmittags	-10.18	13.04.2016
	P-Wa- 2m	morgens	-10.15	13.04.2016
	P-Wa- 18a	nachmittags	-10.64	17.06.2016
	P-Wa- 18m	morgens	-10.55	14.06.2016
	P-Wa- 30a	nachmittags	-10.39	03.08.2016
	P-Wa- 34m	morgens	-10.58	16.08.2016
	P-Wa- 54a	nachmittags	-10.86	12.11.2016
Tränke Stall	P-Wa- 3a	nachmittags	-9.98	13.04.2016
	P-Wa- 3m	morgens	-10.20	13.04.2016
	P-Wa- 19a	nachmittags	-10.60	17.06.2016
	P-Wa- 19m	morgens	-10.64	14.06.2016
	P-Wa- 31a	nachmittags	-10.63	03.08.2016
	P-Wa- 35m	morgens	-10.54	16.08.2016
	P-Wa- 55a	nachmittags	-10.54	12.11.2016

Leitungswasser Stall	P-Wa- 4a	nachmittags	-10.01	13.04.2016
	P-Wa- 4m	morgens	-9.98	13.04.2016
	P-Wa- 20a	nachmittags	-10.42	17.06.2016
	P-Wa- 20m	morgens	-10.31	14.06.2016
	P-Wa- 32a	nachmittags	-10.42	03.08.2016
	P-Wa- 36m	morgens	-10.42	16.08.2016
	P-Wa- 56a	nachmittags	-10.10	12.11.2016

Tabelle 64 Liste aller gemessenen Futterproben: $\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$ - und $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$ -Messergebnisse mit Datum der Beprobung. Für Proben, die mehrfach gemessen wurden sind die Einzelmessungen angegeben, sowie der Mittelwert (MW), welcher für die Auswertung verwendet wurde.

Kategorie	Bezeichnung	Probennummer	Messung	MW ($\delta^{18}\text{O}$ vs VSMOV)	Einzelmessungen ($\delta^{18}\text{O}$ vs VSMOV)			Datum der Beprobung
Brot und Molke	Brot mit Molke	P-Nu-34-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$	30.81	30.77	30.94	30.71	14.06.2016
		P-Nu-18-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$	27.88				12.05.2016
		P-Nu-18-OWa	$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$	-5.29				12.05.2016
	Molke	P-Nu-38-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$	21.37	21.51	21.25	21.35	14.06.2016
		P-Nu-14-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$	15.03				28.04.2016
		P-Nu-14-OWa	$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$	-6.47				28.04.2016
Hoch- energie- futter	Getreide	P-Nu-36-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$	31.82	31.76	31.94	31.77	14.06.2016
	Kartoffel	P-Nu-25-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$	28.87				27.05.2016
		P-Nu-25-OWa	$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$	-5.65				27.05.2016
		P-Nu-33 c-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$	27.47	27.71	27.39	27.30	14.06.2016
		P-Nu-33 b-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$	20.75	21.39	20.88	19.98	14.06.2016
		P-Nu-33 a-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$	28.52	28.36	28.59	28.61	14.06.2016
Niedrig- energie- futter	Silage	P-Nu-47-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$	21.18	21.24	21.26	21.05	28.06.2016
	Gras	P-Nu-48-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$	19.55				28.06.2016
		P-Nu-48-OWa	$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$	-8.79				28.06.2016
		P-Nu-64-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$	22.43	22.67	22.45	22.16	02.08.2016
		P-Nu-72-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$	21.73				16.08.2016
		P-Nu-72-OWa	$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}_{\text{Futter}})$	-8.76				16.08.2016
Sonstiges	Stroh	P-Nu-39-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$	23.39	23.22	23.63	23.32	14.06.2016
	Apfel	P-Nu-81-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{Futter-O})$	28.42	28.44	28.38	28.44	27.09.2016

Tabelle 65 Liste aller gemessenen Weichgewebeproben: $\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$ - und $\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$ -Messergebnisse mit Datum der Beprobung, Individuum und Alterskategorie. Alle untersuchten Individuen wurden am 09.04.2016 geboren.

Typ	Bezeichnung	Alters- kategorie	Indi- vidu- um	Probennummer	Messung	Mess- ergebnis ($\delta^{18}\text{O}$ vs VSMOV)	Datum der Beprobung
Fleisch	Kaumuskel	Ferkel	2	P-Me-2*-1a-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$	10.18	02.05.2016
		Schweine	3	P-Me-3*-Mas-Owa	$\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$	-7.61	02.05.2017
				P-Me-3*-Mas-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$	12.39	02.05.2017
			4	P-Me-4*-Mas-Owa	$\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$	-5.65	02.05.2017
				P-Me-4*-Mas-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$	12.84	02.05.2017
			5	P-Me-5*-Mas-Owa	$\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$	-5.33	06.06.2017
				P-Me-5*-Mas-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$	13.62	06.06.2017
			6	P-Me-6*-Mas-Owa	$\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$	-4.93	06.06.2017
				P-Me-6*-Mas-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$	13.45	06.06.2017
	Laufmuskel	Ferkel	1	P-Me-1*-Fe-Owa	$\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$	-2.74	15.04.2016
				P-Me-1*-Fe-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$	11.02	15.04.2016
			2	P-Me-2*-Fe-Owa	$\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$	-3.85	02.05.2016
				P-Me-2*-Fe-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$	11.94	02.05.2016
		Schweine	3	P-Me-3*-Fe-Owa	$\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$	-7.36	02.05.2017
				P-Me-3*-Fe-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$	11.95	02.05.2017
			4	P-Me-4*-Fe-Owa	$\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$	-6.36	02.05.2017
				P-Me-4*-Fe-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$	10.21	02.05.2017
			5	P-Me-5*-Fe-Owa	$\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$	-5.29	06.06.2017
				P-Me-5*-Fe-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$	11.72	06.06.2017
			6	P-Me-6*-Fe-Owa	$\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$	-4.57	06.06.2017
				P-Me-6*-Fe-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$	12.01	06.06.2017
Organ	Herz		3	P-Or-3*-He-Owa	$\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$	-6.15	02.05.2017
				P-Or-3*-He-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$	12.27	02.05.2017
			4	P-Or-4*-He-Owa	$\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$	-7.52	02.05.2017
				P-Or-4*-He-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$	12.66	02.05.2017
			5	P-Or-5*-He-Owa	$\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$	-5.51	06.06.2017
				P-Or-5*-He-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$	12.87	06.06.2017
			6	P-Or-6*-He-Owa	$\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$	-4.41	06.06.2017
				P-Or-6*-He-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$	13.03	06.06.2017

Anhang

Leber	3	P-Or-3*-Li-Owa	$\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$	-5.95	02.05.2017
		P-Or-3*-Li-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$	16.84	02.05.2017
	4	P-Or-4*-Li-Owa	$\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$	-6.5	02.05.2017
		P-Or-4*-Li-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$	16.78	02.05.2017
	5	P-Or-5*-Li-Owa	$\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$	-5.27	06.06.2017
		P-Or-5*-Li-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$	15.42	06.06.2017
	6	P-Or-6*-Li-Owa	$\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$	-4.07	06.06.2017
		P-Or-6*-Li-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$	19.84	06.06.2017
Niere	3	P-Or-3*-Ki-Owa	$\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$	-6.5	02.05.2017
		P-Or-3*-Ki-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$	13.49	02.05.2017
	4	P-Or-4*-Ki-Owa	$\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$	-6.2	02.05.2017
		P-Or-4*-Ki-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$	13.50	02.05.2017
	5	P-Or-5*-Ki-Owa	$\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$	-6.04	06.06.2017
		P-Or-5*-Ki-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$	13.12	06.06.2017
	6	P-Or-6*-Ki-Owa	$\delta^{18}\text{O}(\text{KW})$	-4.31	06.06.2017
		P-Or-6*-Ki-Otr	$\delta^{18}\text{O}(\text{TR})$	14.23	06.06.2017

Tabelle 66 Liste aller gemessenen Phosphatproben: $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4^{3-})$ -Messergebnisse von Knochen und Zahnschmelz mit Datum der Beprobung, Individuum und Alterskategorie. Alle untersuchten Individuen wurden am 09.04.2016 geboren.

Typ	Alters- kategorie	Skelett- element	Individuum	Probennummer	Messergebnis ($\delta^{18}\text{O}$ vs VSMOV)	Datum der Beprobung
Knochen	Ferkel	Pars Petrosa	1	P-Bo-1*-2-PO4	12.20	15.04.2016
			2	P-Bo-2*-2-PO4	12.83	02.05.2016
			3	P-Bo-3*-Par-PO4	13.11	02.05.2017
			4	P-Bo-4*-Par-PO4	12.99	02.05.2017
			5	P-Bo-5*-Par-PO4	12.97	06.06.2017
			6	P-Bo-6*-Par-PO4	12.70	06.06.2017
	Ferkel	Mandibel	1	P-Bo-1*-3-PO4	13.00	15.04.2016
			2	P-Bo-2*-3-PO4	14.04	02.05.2016
			3	P-Bo-3*-Man-PO4	13.05	02.05.2017
			4	P-Bo-4*-Man-PO4	13.09	02.05.2017
			5	P-Bo-5*-Man-PO4	12.90	06.06.2017
			6	P-Bo-6*-Man-PO4	13.40	06.06.2017

Anhang

Zahn	Ferkel	Femur	1	P-Bo-1*-1-PO4	13.32	15.04.2016
			2	P-Bo-2*-1-PO4	14.52	02.05.2016
	Schweine		3	P-Bo-3*-Fe-PO4	13.40	02.05.2017
			4	P-Bo-4*-Fe-PO4	12.80	02.05.2017
			5	P-Bo-5*-Fe-PO4	12.60	06.06.2017
			6	P-Bo-6*-Fe-PO4	12.90	06.06.2017
	Schweine	Phalanges	3 oder 4	P-Bo-3*/4*-Phal1-PO4	13.30	02.05.2017
			3 oder 4	P-Bo-3*/4*-Phal2-PO4	13.00	02.05.2017
			3 oder 4	P-Bo-3*/4*-Phal3-PO4	13.00	02.05.2017
			3 oder 4	P-Bo-3*/4*-Phal4-PO4	13.49	02.05.2017
		Mittelfuß	5	P-Bo-5*-Mi-PO4	12.60	06.06.2017
			6	P-Bo-6*-Mi-PO4	12.80	06.06.2017
	Milchzahn (Ferkel)	dl	1	P-To-1*-7-PO4	13.06	15.04.2016
			1	P-To-1*-8-PO4	13.38	15.04.2016
			2	P-To-2*-7-PO4	13.96	02.05.2016
			2	P-To-2*-8-PO4	13.36	02.05.2016
		dP1	1	P-To-1*-9-PO4	13.78	15.04.2016
			1	P-To-1*-10-PO4	13.97	15.04.2016
	Molar (Schweine)	M1	4	P-To-4*-M1-PO4	16.15	02.05.2017
			5	P-To-5*-M1-PO4	15.30	06.06.2017
			6	P-To-6*-M1-PO4	15.87	06.06.2017
			3	P-To-3*-M1-PO4	16.72	02.05.2017
		M3	3	P-To-3*-M3-PO4	13.80	02.05.2017
			4	P-To-4*-M3-PO4	13.58	02.05.2017
			5	P-To-5*-M3-PO4	13.30	06.06.2017
			6	P-To-6*-M3-PO4	13.91	06.06.2017

Tabelle 67 Liste aller gemessenen Borstenproben: $\delta^{18}\text{O}$ (Haar)-Messergebnisse mit Datum der Beprobung, Alter bei der Beprobung, Alterskategorie und Individuum. Für Proben, die mehrfach gemessen wurden sind die Einzelmessungen angegeben, sowie der Mittelwert (MW), welcher für die Auswertung verwendet wurde. Alle untersuchten Individuen wurden am 09.04.2016 geboren.

Alters- kategorie	Alter bei Beprobung	Individuum	Probennummer	MW ($\delta^{18}\text{O}$ vs VSMOV)	Einzelmessungen ($\delta^{18}\text{O}$ vs VSMOV)			Datum der Beprobung
Ferkel	Erste Beprobung:	12	P-Br-12-1-Otr	8.73	8.70	8.60	8.90	03.05.2016
	3 Wochen							
	Zweite Beprobung:	7	P-Br-7-2-Otr	9.87	9.60	10.10	9.90	19.07.2016
		9	P-Br-9-2-Otr	10.90	10.90	10.90		19.07.2016
	14 Wochen	12	P-Br-12-2-Otr	10.80	10.80	10.70	10.90	19.07.2016
		14	P-Br-14-2-Otr	11.43	11.50	11.40	11.40	19.07.2016
Schweine		15	P-Br-15-2-Otr	11.13	11.00	11.30	11.10	19.07.2016
	Erste Schlachtung:	3	P-Br-3*-Otr	6.09	6.35	5.82		02.05.2017
		4	P-Br-4*-Otr	5.75	5.88	5.62		02.05.2017
	14 Monate							
	Zweite Schlachtung:	5	P-Br-5*-Otr	5.33	5.57	5.10		06.06.2017
		6	P-Br-6*-Otr	6.40	6.34	6.46		06.06.2017
	15 Monate							

Standards:

Tabelle 68 Liste der bei den $\delta^{18}\text{O}$ -Messungen mitgeführten Standards.

Probentyp	Probennummer	Messergebnis ($\delta^{18}\text{O}$ vs VSMOV)
NBS NIST 1400	NIST 1400 PO4 1	16.70
	NIST 1400 PO4 2	16.67
	NIST 1400 PO4 3	16.85
NBS 120c	NBS 120c 1	22.80
	NBS 120c 2	22.77
	NBS 120c 3	22.85
	NBS 120c 4	22.78
	NBS 120c 5	22.80

XIII. Danksagung

Mein Dank gilt allen, die zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen haben.

Allen voran möchte ich mich bei Prof. Dr. Gisela Grupe bedanken, für die kompetente Betreuung und Unterstützung meiner Doktorarbeit. Sie setzte viel Vertrauen in meine Fähigkeiten, ermutigte mich zu selbständigem, interdisziplinärem Arbeiten und holte mich gelegentlich zurück auf den Boden der Tatsachen, wenn mein Kopf zu voll war mit möglichen Problemen und Hürden und ich vorübergehend das Potential meiner Daten aus den Augen verlor.

Prof. Dr. Roland Melzer danke ich für das Zweitgutachten meiner Arbeit und das bereitwillige Auseinandersetzen mit diesem fachfremden Thema.

Sehr herzlich bedanke ich mich auch bei Dr. Marina Vohberger-Herles, der Initiatorin und Leiterin des SPOCK-Projektes, in welches meine Arbeit eingebettet war. Sie war mir nicht nur eine kompetente Vorgesetzte, Projektpartnerin und Mentorin, sondern auch eine sehr gute Freundin, die auch in schweren Zeiten für mich da war und mir notfalls einen beherzten Stoß gab, um mich wieder auf Kurs zu bringen.

Besonderer Dank gilt auch Ludwig Scherm vom Biohof Scherm, der sich dazu bereit erklärte, seinen Hof und seine Tiere für unsere Untersuchungen zur Verfügung zu stellen, darüber hinaus großes Interesse an unserer Arbeit zeigte und uns tatkräftig unterstützte und in landwirtschaftlichen und tierbezogenen Fragen kompetent beriet.

An dieser Stelle sei auch Herrn Dr. Ziegler vom Tiergesundheitsdienst des Landkreises Deggendorf gedankt, der die Versuchstiere veterinärmedizinisch begleitete und die Blutabnahmen an lebenden Individuen durchführte.

Natürlich möchte ich mich auch bei allen Studenten bedanken, die über die Zeit hinweg dabei halfen, das SPOCK-Projekt zu realisieren und mich motiviert bei meiner Arbeit unterstützten. Vielen Dank Amira Osmanovic, Hannah Michel, Julia Kretzinger, Vivien Lücke, Heidi Jäger, Lukas Ostermaier, Vivian Laban, Lara Schwarzkopf, Alexandra von Stempel und Miriam Kastlmeier für eine unvergessliche Zeit!

Samantha Black möchte ich dafür danken, dass sie mir stets eine Stütze war und mich mit ihrer ungebrochen guten Laune aufmunterte, wenn es bei meiner Arbeit einmal stressig wurde.

Ich danke außerdem meinen Kooperationspartnern an den verschiedenen Institutionen, die nicht nur externe Messungen durchführten, sondern mich auch bereitwillig bei methodischen Fragen und Problemen berieten und unterstützten. Sie zeigten mir, wie gut Wissenschaft in einem kollegialen und gegenseitig unterstützenden Rahmen interdisziplinär und institutionsübergreifend funktionieren kann.

Ich danke Prof. Dr. Stefan Hölzl und Dipl. Biol. Karin Heck vom Rieskratermuseum Nördlingen für die Messungen der Strontiumisotopen und den kollegialen Austausch in Bezug auf Probenaufbereitung und Massenspektrometrie.

Ich danke PD Dr. Christoph Mayr vom Institut für Geographie der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, der die Sauerstoffisotopen-Messungen der Trockenmasse, Borsten und Phosphatproben übernahm und bei der Methodenetablierung mit Rat und Tat zur Stelle war.

Dr. Robert van Geldern vom GeoZentrum Nordbayern der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg und Dr. Jens Dyckmans vom Büsgen-Institut der Georg-August-Universität Göttingen danke ich für die Messung der Trink-, Futter- und Gewebswasserproben, für die kompetente Beratung bei

Danksagung

der Wahl der richtigen Methode die zahlreichen Erläuterungen zu den entsprechenden Extraktions- und Messvorgängen.

Bei Prof. Dr. Rudolf Huth und Dipl.-Ing. Annette Stallauer vom Chemie- und Umweltanalytiklabor der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf möchte ich mich für die Konzentrationsbestimmungen an den Strontiumproben bedanken und die vorangegangene Beratung zur optimalen Messmethode.

Ich möchte mich außerdem bei den Mitarbeitern des Schlachthofes Zwiesel bedanken, die mir Zugang zu ihren Räumlichkeiten gewährten und mir bei der Probenentnahme halfen.

Sehr herzlich danke ich Dr. Michaela Hofmann, die mich bei der Sektion der Ferkel und Schweine begleitete und mich mit ihren umfassenden anatomischen Kenntnissen, sowie ihrer Präparationserfahrung unterstützte. Ich danke ihr auch für eine langjährige Freundschaft und ein stets offenes Ohr in allen Lebenslagen.

Auch bei Dr. Ferdinand Neuberger möchte ich mich bedanken, für die Hilfe und Unterstützung beim Mazerieren der Knochen- und Zahnproben und die Bereitstellung der dazu nötigen Chemikalien und Geräte.

Dr. Philomena Bodensteiner danke ich dafür, dass sie, gemeinsam mit ihrem Mann auch noch die letzten unbekannten Unkrautsamen in der Futtermischung botanisch bestimmte, wofür sogar einige Samen ausgesät und die Bestimmung anhand der Keimlinge durchgeführt wurde.

Prof. Dr. Karl Auerswald vom Lehrstuhl für Grünlandlehre der Technischen Universität München danke ich für ein ausgiebiges stimulierendes und ermutigendes Gespräch zum Thema Massebilanz-Modellierungen von Sauerstoffisotopen in kontrollierten landwirtschaftlichen Studien, welches mir half, die Möglichkeiten und Grenzen meiner Datensätze auszuloten.

Danken möchte ich auch Prof. Dr. Ursula Wittwer-Backofen von der Universität Freiburg, die mir, durch ein positives Gutachten zu meiner Kompetenz nach einem sehr anregenden Gespräch, wohl den Zugang zu meinem Stipendium ermöglichte, ohne das ich meine Arbeit nicht hätte durchführen können.

Deswegen möchte ich mich auch besonders bei der Studienstiftung des Deutschen Volkes bedanken, die mir mit einem Promotionsstipendium überhaupt erst meine Doktorarbeit ermöglichte und dabei großes Vertrauen in mich und meine fachliche Eignung setzte.

Nicht zuletzt möchte ich meinen Kolleginnen und Kollegen in der Arbeitsgruppe Anthropologie und Umweltgeschichte danken. Auch dank ihnen wird mir meine Promotionszeit in positiver Erinnerung bleiben. Die regelmäßigen Teepausen halfen mir, den Kopf frei zu bekommen und zwischendurch auch etwas zu lachen.

Ich danke Dr. Fabiola Lengfelder, für intensive fachliche Diskussionen und vor allem für eine langjährige Freundschaft seit unserem ersten Studiensemester. Ich danke Larissa Otto für ihr stets offenes Ohr und ihre emotionale Unterstützung über die Jahre hinweg. Ich danke meinen Schreibtischnachbarn Dr. Andrea Göhring, Sidney Sebald und Franziska Immler für lustige Gesprächsthemen einerseits und konstruktive Kritik an meiner Arbeit, die mir dabei half meine Ansätze regelmäßig kritisch zu hinterfragen.

Salah Soliman danke ich für die tatkräftige Unterstützung gute Gespräche im Labor.

Leeanne Mundle möchte ich für das Korrekturlesen meiner wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Manuskripte danken und für das gegenseitige Motivieren in der letzten Schreibphase.

Danksagung

Ich danke auch Dr. Sandra Franz-Guess, einer guten Studien- und Promotionsfreundin aus dem Fachbereich Zoologie, die stets für einen Kaffee und eine gute Unterhaltung zu haben war.

Bei meiner Familie und meinen Freunden kann ich mich nicht genug dafür bedanken, dass sie mich immer unterstützten und mich auch dann ertrugen, wenn ich stress- oder frustrationsbedingt vorübergehend an Umgänglichkeit einbüßte. Sie waren mir immer ein Anker und ein emotionaler Ausgleich und ich konnte mich stets auf sie verlassen.

XIV. Lebenslauf: Dominic Anders

Ausbildung

Hochschulausbildung

- | | |
|-----------------------------|---|
| März 2016 - heute | Ludwig-Maximilians-Universität München

Promotion zum Thema: „Source partitioning of stable isotopes in the body tissues of livestock“ (Betreuerin: Prof. Dr. Gisela Grupe) |
| Okt 2013 - März 2016 | Ludwig-Maximilians-Universität München

Master oft Science in Allgemeiner Biologie

Abschlussnote: 1,0

Masterarbeit zum Thema: „Handel und Migration im Palästina des 13. und 12. Jahrhunderts vor Christus: Strontium- und Sauerstoff-isotopenanalyse an Skelettfunden aus Tel Nami (Israel)“ (Betreuerin: Prof. Dr. Gisela Grupe)

Note: 1,0 |
| Okt 2010 - Sept 2013 | Ludwig-Maximilians-Universität München

Bachelor of Science in Allgemeiner Biologie

Abschlussnote: 1,6

Bachelorarbeit zum Thema: „Bestandssituation der Fledermauspopulationen im Landkreis Dillingen an der Donau“ (Betreuer: Dr. Andreas Zahn)

Note: 1,0 |

Schulausbildung

- | | |
|-----------------------------|--|
| Sept 2001 - Mai 2010 | Willi-Graf-Gymnasium München

Leistungskurse: Deutsch, Mathematik

Abiturnote: 1,2 |
|-----------------------------|--|

Betreuung von Abschlussarbeiten und Forschungspraktika

- | | |
|-----------------------------|--|
| Jan 2016 - März 2018 | Jeweils zehnwöchige Forschungspraktika im Rahmen des SPOCK-Projektes: J. Kretzinger, H. Jäger, L. Ostermair, A. v. Strempel, L. Schwarzkopf, M. Kastlmeier, V. Laban, V. Lücke |
| Apr 2018 - Okt 2018 | T. Reska, B.Sc.: „Applications, Possibilities and Limits of Strontium Isotopes Analyses.“ |

Apr 2017 - Okt 2017 A. Osmanovic, M.Sc.: "Analyse stabiler Strontiumisotopenverhältnisse im Hart- und Weichgewebe von Hausschweinen im Rahmen einer kontrollierten Fütterungsstudie."

Mai 2016 - Aug 2016 H. Michel, B.Sc.: „Aufnahme von stabilen Isotopendaten von Umweltproben zur Kartierung eines Biobauernhofes" im Rahmen des Projekts "Source Partitioning of Stable Isotopes in the Body Tissues of Livestock."

Publikationen

-
- 2020 (in prep.)** Anders, D. et al. (2017) Trade, Mobility and Transculturality in the Levant during the Bronze Age – A stable isotope analysis of Megiddo, Tell es-Safi and Tel Nami, in: Plos one (in prep.).
- Feb 2019** Anders, D. et al. (2018) Intra- and inter-individual variability of stable strontium isotope ratios in hard and soft body tissues of pigs, in: Rapid Communications in Mass Spectrometry.
- Sept 2018** Söhner, F. & Anders, D. (2018) Soziale Identität und gleichberechtigte Teilhabe, in: IABLIS Jahrbuch für europäische Prozesse. „Die ungleichen Gleichen – ›Gleichheit‹ als gesellschaftliches Konzept“, 17. Jg., Institut für Neuere deutsche und europäische Literatur, Fernuniversität in Hagen.
- April 2018** Gastbeitrag (2018): Wie totes Holz den Wald belebt, in: blog.museumspieren: Artikelreihe „Auf dem Holzweg“, im Auftrag von BIOTOPIA – Naturkundemuseum Bayern.
- Nov 2015** Söhner, F. & Anders, D. (2016) „Rezension zu Bertrand Perz et al. (Hg.): Schlussbericht der Kommission zur Untersuchung der Vorgänge um den Anstaltsfriedhof des Psychiatrischen Krankenhauses in Hall in Tirol in den Jahren 1942 bis 1945.“ Universitätsverlag Wagner, Innsbruck, 2014, in: VIRUS. Beiträge zur Sozialgeschichte der Medizin.

Vorträge

-
- Sept 2019** Anders, D. et al. (2019) "Stable isotope ranges in modern domestic pigs compared with their diet and environmental surroundings." Vortrag im Rahmen des Jährlichen Treffens der European Association of Archaeologists (EAA).
- Sept 2018** Vohberger, M. & Anders D. (2018) "Isotope migration through space, time, and body tissues: Where is the local signature in a globalized world?" Vortrag im Rahmen des 24ten Jährlichen Treffens der European Association of Archaeologists (EAA) .
- Sept 2017** Anders, D. et al. (2017) "Domestic pigs as reference material for investigation of human mobility in the ancient Levant." Vortrag im

Rahmen des Kongresses der Gesellschaft für Anthropologie (GfA) zum Thema: „Homo Homini Lupus? – Between Conflict and Cooperation.“

Poster

- | | |
|-------------------|--|
| April 2017 | Anders, D. et al. (2017) „Examining the pig in the poke: What happens with stable isotopes in the body tissues of livestock?“
Poster im Rahmen des 86ten jährlichen Treffens der American Association of Physical Anthropologists (AAPA) in New Orleans |
| April 2017 | Kretzinger, J.; Anders, D. et al. (2017) „Of Pirates, Pigs and Philistines: A novel perspective on the Late Bronze/Iron Age Transition in the Southern Levant.“ Poster im Rahmen des 86ten jährlichen Treffens der American Association of Physical Anthropologists (AAPA) in New Orleans |
| Sept 2015 | Anders, D. et al. (2015) “A tooth for a tooth, a bone for a bone: Unravelling the Promised Land’s past with stable isotope analysis.”
Poster im Rahmen des Kongresses der Gesellschaft für Anthropologie (GfA) zum Thema: „Evolutionäre und moderne Herausforderungen für Homo sapiens – Eine anthropologische Spurensuche“ |

Stipendien/Auszeichnungen

- | | |
|-------------------------------|---|
| März 2017 - heute | Promotionsstipendium der Studienstiftung des deutschen Volkes |
| Nov 2016 | Auszeichnung im Zuge der „BestMasters 2016“-Ausschreibung des Springer Verlages |
| Sept 2015 - April 2016 | Förderpreisprojekt (Lehre@LMU Förderpreis) der Ludwig-Maximilians-Universität München |

Konferenzteilnahmen/Workshops/Seminare

- | | |
|-------------------|--|
| Feb 2020 | Workshop: „Schreibwerkstatt: Wissenschaftsjournalismus“ des Spektrum der Wissenschaft Verlages in Heidelberg |
| Sept 2019 | 25. Jährliches Treffen der European Association of Archaeologists (EAA) in Bern |
| Jan 2019 | Workshop: „Future Supper – Sustainable Food Design“, Gemeinschaftsprojekt der Fakultät für Design der Hochschule München, des Biozentrums der LMU München und von BIOTOPIA – Naturkundemuseum Bayern |
| Sept 2017 | 12. Konferenz der GfA: „Homo Homini Lupus? – Between Conflict and Cooperation“ (Geislingen an der Steige) |
| April 2017 | 86. Jährliches Treffen der Association of Physical Anthropologists (AAPA) in New Orleans |

- Nov 2016** Workshop: „Anatomie des menschlichen Weichgewebes in Bezug zu Merkmalsausprägungen am Knochen“ der AG Paläoanthropologie und Prähistorische Anthropologie (APPA) am Zentrum der Anatomie der Universitätsmedizin Göttingen
- Sept 2015** 11. Konferenz der GfA: „Evolutionary and Modern Challenges to Homo sapiens - An Anthropological Inquiry“ (München)
- Okt 2014** Internationaler Workshop der Forschergruppe Transalpine Mobilität und Kulturtransfer (München)

Dominic Anders

München, 19.02.2020